

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Área de Ingeniería Mecánica

# ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DEL ROBOT PASIBOT

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA  
PROYECTO FIN DE CARRERA

**AUTOR: DAVID MARTÍNEZ ALBERTO**

TUTORA: CRISTINA CASTEJÓN

LEGANÉS, SEPTIEMBRE DEL 2008



## **Agradecimientos**

Ahora que termino la carrera quiero dar las gracias a mi familia por apoyarme en todo momento y no permitir que tirara la toalla cuando suspendía algún examen.

También quiero dar las gracias a todos los amigos que he hecho en la universidad que son los mejores, Víctor, Nacho, Ricardo, Pablo (espero que te mejores pronto y que vuelvas a la universidad a dar guerra) María y compañía.

Dar las gracias a Cristina Castejón por ayudarme a realizar este proyecto hasta el último momento. A Jesús Meneses también agradecerle el modelo facilitado en Working Model porque sin el modelo no se que hubiera hecho.

Finalmente darles las gracias a todos los conocidos que de alguna manera me han ayudado en la carrera.



---

# Índice

## Contenido del Proyecto

### Páginas

• Capítulo 1: Objetivos y estructura del proyecto.....	1
○ 1.1.- Motivación.....	2
○ 1.2.- Objetivos.....	3
○ 1.3.- Estructura.....	3
• Capítulo 2: Introducción.....	6
○ 2.1.- Introducción a la robótica.....	7
○ 2.2.- Clasificación y tipos de robots.....	10
➤ Robots industriales.....	10
➤ Robots de servicio.....	19
○ 2.3.- Historia de los robots bípedos.....	22
➤ Robots pasivos.....	22
➤ Robots activos.....	28
• Capítulo 3: Introducción a Working Model 2D y diseño del robot Pasibot en Working Model 2D.....	41
○ 3.1.- Introducción al Working Model 2D.....	42
○ 3.2.- Diseño del robot Pasibot con Working Model 2D.....	49
○ 3.3.- Obtención de los resultados del robot Pasibot con WM 2D.....	68
• Capítulo 4: Análisis Cinemático del robot Pasibot.....	74
○ 4.1.- Análisis cinemático del robot Pasibot con Working Model 2D.....	75
1º. Caso 1: Robot Pasibot parado con los dos pies a la misma altura.....	81
➤ Posición.....	82
➤ Velocidad.....	85
➤ Aceleración.....	87
2º. Caso 2: Robot Pasibot parado y el paso iniciado.....	89

➤ Posición.....	92
➤ Velocidad.....	96
➤ Aceleración.....	102
3º. Caso 3: Robot Pasibot en movimiento realizando un paso completo considerando un pie anclado al suelo.....	108
➤ Posición.....	110
➤ Velocidad.....	113
➤ Aceleración.....	117
4º. Caso 4: Robot Pasibot en movimiento con diferentes dimensiones.....	125
➤ Posición.....	130
➤ Velocidad.....	133
➤ Aceleración.....	137
○ 4.2.- Comprobación de los resultados con el modelo analítico.....	141
❖ 4.2.1.- Estudio del primer mecanismo.....	143
➤ Posición del punto B.....	145
➤ Velocidad del punto B.....	151
➤ Aceleración del punto B.....	156
❖ 4.2.2.- Estudio del segundo mecanismo.....	161
➤ Posición del punto A.....	163
● Capítulo 5: Análisis Dinámico del robot Pasibot.....	169
○ 5.1.- Análisis dinámico del robot Pasibot con Working Model 2D.....	170
1º. Caso 1: Robot Pasibot parado con los dos pies a la misma altura.....	173
➤ Fuerza en los eslabones.....	174
➤ Par de los eslabones.....	176
➤ Fuerza en la Cadera.....	177
➤ Par de la Cadera.....	179
Conclusiones del Caso 1.....	180
2º. Caso 2: Robot Pasibot parado y el paso iniciado.....	181
➤ Fuerza en los eslabones.....	182

➤ Par de los eslabones.....	184
➤ Fuerza en la Cadera.....	185
➤ Par de la Cadera.....	187
Conclusiones del Caso 2.....	188
3°. Caso 3: Robot Pasibot en movimiento realizando un paso completo considerando un pie anclado al suelo.....	189
➤ Fuerza en los eslabones.....	190
➤ Par de los eslabones.....	192
➤ Fuerza en la Cadera.....	193
➤ Par de la Cadera.....	195
➤ Par del Motor.....	196
➤ Potencia del Motor.....	197
Conclusiones del Caso 3.....	198
4°. Caso 4: Robot Pasibot en movimiento con diferentes dimensiones.....	199
➤ Fuerza en los eslabones.....	200
➤ Par de los eslabones.....	202
➤ Fuerza en la Cadera.....	203
➤ Par de la Cadera.....	204
➤ Par del Motor.....	205
➤ Potencia del Motor.....	206
Conclusiones del Caso 4.....	207
• Capítulo 6: Conclusiones y futuros desarrollos.....	208
○ 6.1.- Conclusiones.....	209
○ 6.2.- Futuros desarrollos.....	210
• Capítulo 7: Bibliografía.....	211



## Índice de figuras

### Páginas

➤ Figura 2.1: Isaac Asimov.....	8
➤ Figura 2.2: Configuración cartesiana.....	13
➤ Figura 2.3: Volumen de trabajo cúbico.....	13
➤ Figura 2.4: Configuración cilíndrica.....	14
➤ Figura 2.5: Volumen de trabajo cilíndrico.....	14
➤ Figura 2.6: Configuración polar.....	15
➤ Figura 2.7: Configuración angular.....	15
➤ Figura 2.8: Volumen de trabajo irregular.....	16
➤ Figura 2.9: Algunos tipos de robots de servicio.....	20
➤ Figura 2.10: Robot de servicio móvil.....	20
➤ Figura 2.11: Telemanipulador.....	21
➤ Figura 2.12: Juguete de la década de los 30 del siglo XX denominado “Wilson Walkie”.....	22
➤ Figura 2.13: Plano original de la patente de Wilson Walkie.....	23
➤ Figura 2.14: Evolución del robot bípedo pasivo de McGeer al robot de Wisse y Ruina.....	24
➤ Figura 2.15: Robot de la Universidad de Cornell.....	25
➤ Figura 2.16: Robot Toddlers.....	26
➤ Figura 2.17: Robot Denise.....	27
➤ Figura 2.18: Robot Nagoya (2005).....	27
➤ Figura 2.19: Wabot-1.....	28
➤ Figura 2.20: Wabot-2.....	29
➤ Figura 2.21: Wabian.....	29
➤ Figura 2.22: Wabian-2.....	30
➤ Figura 2.23: Evolución de los robots humanoides de Honda.....	31
➤ Figura 2.24: E0 de Honda (1986).....	31
➤ Figura 2.25: E5 de Honda (1992).....	32

➤ Figura 2.26: P2 de Honda (1995).....	32
➤ Figura 2.27: P3 de honda (1997).....	33
➤ Figura 2.28: Asimo (2000-Actualidad).....	34
➤ Figura 2.29: HRP-2P.....	36
➤ Figura 2.30: H6 (2001).....	37
➤ Figura 2.31: Johnnie (2001).....	37
➤ Figura 2.32: Partner (2004).....	38
➤ Figura 2.33: Qrio (2004).....	39
➤ Figura 2.34: Rh-0 (2004) y Rh-1 (2007).....	40
➤ Figura 3.1: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.....	42
➤ Figura 3.2: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.....	44
➤ Figura 3.3: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.....	45
➤ Figura 3.4: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.....	47
➤ Figura 3.5: Ejemplo de diseño con Working Model 2D y sistema real.....	48
➤ Figura 3.6: Denominación de las piezas que componen el robot Pasibot.....	50
➤ Figura 3.7: Botón que diseña un rectángulo en Working Model 2D.....	51
➤ Figura 3.8: Variación de las coordenadas y las dimensiones de la pieza seleccionada.....	52
➤ Figura 3.9: Denominaciones de las dimensiones de los eslabones del robot Pasibot.....	52
➤ Figura 3.10: Botón “polygon” que diseña un polígono irregular en WM 2D....	54
➤ Figura 3.11: Plano de la Cadera.....	54
➤ Figura 3.12: Diseño de la Cadera del robot Pasibot utilizada en Working Model 2D.....	55
➤ Figura 3.13: Botón “Motor” que proporciona un Motor en WM 2D.....	55
➤ Figura 3.14: Colocación del Motor en la Cadera del robot Pasibot.....	56
➤ Figura 3.15: “Point element” que crea el punto de unión entre dos piezas.....	57
➤ Figura 3.16: Forma de localizar uniones en las piezas del robot Pasibot.....	57
➤ Figura 3.17: Uniones simples de los eslabones del robot Pasibot.....	58
➤ Figura 3.18: Uniones intermedias de los eslabones del robot Pasibot.....	59
➤ Figura 3.19: Botón “Pin joint” que realiza la unión directa de dos eslabones en WM 2D.....	59

➤ Figura 3.20: Dimensiones de los eslabones del robot Pasibot con uniones intermedias.....	60
➤ Figura 3.21: Uniones de la Cadera del robot Pasibot.....	60
➤ Figura 3.22: Botón “Slot element” que crea una guía horizontal en Working Model 2D.....	61
➤ Figura 3.23: Creación de la guía en la Cadera del robot Pasibot.....	61
➤ Figura 3.24: Guía creada en la Cadera del robot Pasibot.....	62
➤ Figura 3.25: Botón “Join” que permite unir dos puntos de unión previamente seleccionados.....	63
➤ Figura 3.26: Imagen que indica que no se puede realizar una unión porque no se ha seleccionado los dos puntos de unión previamente.....	63
➤ Figura 3.27: Botón “Split” que permite separar dos puntos previamente unidos.....	64
➤ Figura 3.28: Puntos de unión del robot Pasibot.....	65
➤ Figura 3.29: Opción "Measure" de Working Model 2D.....	69
➤ Figura 3.30: Opciones desplegadas en el menu de Measure.....	69
➤ Figura 3.31: Botón Stop que detiene la simulación.....	69
➤ Figura 3.32: Botón "Pause Control".....	70
➤ Figura 3.33: Opciones de "Pause Control".....	70
➤ Figura 3.34: Menú desplegable de las reacciones de un eslabón.....	71
➤ Figura 3.35: Botón “Run” que inicia de la simulación.....	72
➤ Figura 3.36: Opción de exportar los resultados con Working Model 2D.....	72
➤ Figura 3.37: Botón "Anchor".....	73
➤ Figura 4.1: Pasibot diseñado con Working Model 2D.....	75
➤ Figura 4.2: Movimiento del robot Pasibot.....	77
➤ Figura 4.3: Movimiento del robot Pasibot en el caso 1.....	81
➤ Figura 4.4: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 1).....	82
➤ Figura 4.5: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 1).....	82
➤ Figura 4.6: Evolución del módulo de la velocidad en función del tiempo (Caso 1).....	85
➤ Figura 4.7: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 1).....	86

➤ Figura 4.8: Evolución del módulo de la aceleración en función del tiempo (Caso 1).....	87
➤ Figura 4.9: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 1).....	88
➤ Figura 4.10: Movimiento del robot Pasibot en el caso 2.....	91
➤ Figura 4.11: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 2).....	92
➤ Figura 4.12: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 2).....	94
➤ Figura 4.13: Evolución de la velocidad respecto al eje X en función del tiempo (Caso 2).....	96
➤ Figura 4.14: Evolución de la velocidad respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 2).....	98
➤ Figura 4.15: Evolución del módulo de la velocidad en función del tiempo (Caso 2).....	100
➤ Figura 4.16: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 2).....	101
➤ Figura 4.17: Evolución de la aceleración respecto al eje X en función del tiempo (Caso 2).....	102
➤ Figura 4.18: Evolución de la aceleración respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 2).....	104
➤ Figura 4.19: Evolución del módulo de la aceleración en función del tiempo (Caso 2).....	105
➤ Figura 4.20: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 2).....	107
➤ Figura 4.21: Movimiento del Pasibot en el caso 3.....	109
➤ Figura 4.22: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 3).....	110
➤ Figura 4.23: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).....	112
➤ Figura 4.24: Evolución de la velocidad respecto al eje X en función del tiempo (Caso 3).....	113

➤ Figura 4.25: Evolución de la velocidad respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 3).....	114
➤ Figura 4.26: Evolución del módulo de la velocidad en función del tiempo (Caso 3).....	115
➤ Figura 4.27: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 3).....	116
➤ Figura 4.28: Evolución de la aceleración en el eje X en función del tiempo (Caso 3).....	117
➤ Figura 4.29: Evolución de la aceleración en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).....	119
➤ Figura 4.30: Evolución del módulo de la aceleración en función del tiempo (Caso 3).....	121
➤ Figura 4.31: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 3).....	123
➤ Figura 4.32: Movimiento que realiza el robot Pasibot en el caso 4.....	129
➤ Figura 4.33: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 4).....	130
➤ Figura 4.34: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 4).....	130
➤ Figura 4.35: Evolución de la velocidad respecto al eje X en función del tiempo (Caso 4).....	133
➤ Figura 4.36: Evolución de la velocidad respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 4).....	133
➤ Figura 4.37: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 4).....	136
➤ Figura 4.38: Evolución de la aceleración respecto al eje X en función del tiempo (Caso 4).....	137
➤ Figura 4.39: Evolución de la aceleración respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 4).....	137
➤ Figura 4.40: Evolución de la aceleración del CDG de la Cadera en el eje Y (Caso 4).....	139
➤ Figura 4.41: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 4).....	140

➤ Figura 4.42: Representación de los ejes reales e imaginarios.....	142
➤ Figura 4.43: Señalización con un círculo rojo de la zona del robot Pasibot con la que se ha trabajado.....	143
➤ Figura 4.44: Mecanismo simplificado y señalización del punto B.....	144
➤ Figura 4.45: Señalización de los puntos a y b.....	145
➤ Figura 4.46: Posición del punto B en el eje X con Matlab 7.0.....	147
➤ Figura 4.47: Posición del punto B en el eje X con Working Model 2D.....	147
➤ Figura 4.48: Posición del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.....	149
➤ Figura 4.49: Posición del punto B en el eje Y con Working Model 2D.....	149
➤ Figura 4.50: Velocidad del punto B en el eje X con Matlab 7.0.....	152
➤ Figura 4.51: Velocidad del punto B en el eje X con Working Model 2D.....	152
➤ Figura 4.52: Velocidad del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.....	154
➤ Figura 4.53: Velocidad del punto B en el eje Y con Working Model 2D.....	154
➤ Figura 4.54: Aceleración del punto B en el eje X con Matlab 7.0.....	157
➤ Figura 4.55: Aceleración del punto B en el eje X con Working Model 2D.....	157
➤ Figura 4.56: Aceleración del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.....	159
➤ Figura 4.57: Aceleración del punto B en el eje Y con Working Model 2D.....	159
➤ Figura 4.58: Representación de color verde de las piezas del robot Pasibot.....	161
➤ Figura 4.59: Mecanismo simplificado y señalización del punto A.....	162
➤ Figura 4.60: Señalización de los puntos a, b, M, B, A.....	163
➤ Figura 4.61: Posición del punto A en el eje X con Matlab 7.0.....	165
➤ Figura 4.62: Posición del punto A en el eje X con Working Model 2D.....	165
➤ Figura 4.63: Posición del punto A en el eje Y con Matlab 7.0.....	167
➤ Figura 4.64: Posición del punto A en el eje Y con Working Model 2D.....	167
➤ Figura 5.1: Robot Pasibot diseñado con Working Model 2D.....	170
➤ Figura 5.2: Movimiento del robot Pasibot en el caso 1.....	173
➤ Figura 5.3: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 1).	174
➤ Figura 5.4: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 1).....	175
➤ Figura 5.5: Evolución del módulo de la fuerza en función del tiempo (Caso 1).....	175
➤ Figura 5.6: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 1).....	176

➤ Figura 5.7: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X en función del tiempo (Caso 1).....	177
➤ Figura 5.8: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje Y en función del tiempo (Caso 1).....	178
➤ Figura 5.9: Evolución del módulo de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 1).....	178
➤ Figura 5.10: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 1)...	179
➤ Figura 5.11: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 2).....	182
➤ Figura 5.12: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 2).....	183
➤ Figura 5.13: Evolución del módulo de la fuerza en función del tiempo (Caso 2).....	183
➤ Figura 5.14: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 2).....	184
➤ Figura 5.15: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X en función del tiempo (Caso 2).....	185
➤ Figura 5.16: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje Y en función del tiempo (Caso 2).....	186
➤ Figura 5.17: Evolución del módulo de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 2).....	186
➤ Figura 5.18: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 2)...	187
➤ Figura 5.19: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 3).....	190
➤ Figura 5.20: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).....	191
➤ Figura 5.21: Evolución del módulo de la fuerza en función del tiempo (Caso 3).....	191
➤ Figura 5.22: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 3).....	192
➤ Figura 5.23: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X en función del tiempo (Caso 3).....	193
➤ Figura 5.24: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).....	194

➤ Figura 5.25: Evolución del módulo de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 3).....	194
➤ Figura 5.26: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 3)...	195
➤ Figura 5.27: Evolución del Par del Motor en función del tiempo (Caso 3).....	196
➤ Figura 5.28: Evolución de la potencia del Motor en función del tiempo (Caso 3).....	197
➤ Figura 5.29: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 4).....	200
➤ Figura 5.30: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 4).....	200
➤ Figura 5.31: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 4).....	202
➤ Figura 5.32: Evolución de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 4).....	203
➤ Figura 5.33: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 4)...	204
➤ Figura 5.34: Evolución del Par del Motor en función del tiempo (Caso 4).....	205
➤ Figura 5.35: Evolución de la potencia del Motor en función del tiempo (Caso 4).....	206



## Índice de tablas

### Páginas

➤ Tabla 2.1: Clasificación por prestaciones según la AFRI.....	17
➤ Tabla 2.2: Clasificación futurista según Knasel.....	19
➤ Tabla 3.1: Dimensiones de los eslabones del robot Pasibot.....	53
➤ Tabla 3.2: Puntos de unión de las piezas del robot Pasibot.....	66
➤ Tabla 4.1: Características técnicas de las piezas del Robot Pasibot.....	78
➤ Tabla 4.2: Dimensiones del robot Pasibot utilizado en este caso.....	125
➤ Tabla 4.3: Características técnicas de las piezas del Robot Pasibot del caso 4..	128

---

# Capítulo 1

**Objetivos y estructura del proyecto.**

## **1.1.- Motivación.**

La robótica de servicios es una de las áreas prioritarias de investigación en el campo de la robótica y automatización tal y como se puede observar por ejemplo en la feria robótica de Hannover, así como lo demuestran los primeros borradores de áreas temáticas del 7º Programa Marco de la Unión Europea, y las sendas de investigación (road map) de las dos únicas redes Europeas de robótica, Euron y Clawar. La aplicación de los robots a tareas de servicios (asistencia personal, educación, tareas sociales, etc.) hace que su diseño sea de suma importancia. Los robots móviles actuales no están adaptados para ser utilizados en entornos domésticos, debido a su volumen y a su falta de maniobrabilidad en un entorno tan complejo como son estos escenarios. Por supuesto, hay ciertas excepciones, como es el caso del exitoso robot Roomba, (robot aspiradora), de pequeño volumen, lo que facilita su movilidad.

En este campo han surgido muchos proyectos internacionales de desarrollo de robots humanoides adaptados a entornos domésticos o de oficinas que trabajen como robots de servicio, puesto que pueden llegar a tener mejor maniobrabilidad y facilita para moverse en entornos con superficies irregulares, como escaleras, trancos, etc.

La motivación final de la realización de una serie de proyectos, entre los que se encuentra este proyecto, es el desarrollo de un robot bípedo de tamaño natural y ligero de pocos grados de libertad, con el mínimo número posible de actuadores en las articulaciones que posea. Los robots humanoides actuales tienen un número alto de grados de libertad que en la mayoría de los casos hace que tengan un peso elevado en las piernas debido al peso de sus correspondientes motores y actuadores. Este hecho hace que los robots humanoides sean muy costosos. Para la construcción de este robot bípedo, se estudiara un novedoso diseño, nuevos mecanismos para la robótica, pero clásicos para la ciencia de las máquinas y mecanismos (Peaucellier, Watt, pantógrafo, etc.) que permitan desarrollar un paso adecuado, mediante técnicas de control dinámica pasiva (que disminuirá los costes de construcción del robot bípedo).

## **1.2.- Objetivos.**

Los objetivos de este proyecto se dividen en dos principalmente. En primer lugar, un análisis cinemático de las diferentes piezas del robot Pasibot y en segundo lugar, un análisis dinámico de las piezas del robot Pasibot que más interesantes resulten a la hora de sus cálculos.

Para realizar estos dos análisis, se debe crear previamente un diseño simplificado de la estructura del robot Pasibot mediante un programa denominado Working Model 2D.

Después de realizar el diseño simplificado con dicho programa, se obtendrán la posición, velocidad y aceleración de distintas piezas del robot Pasibot en diferentes casos, para ver cómo actúa el robot Pasibot ante diferentes circunstancias.

Una vez analizados y comprobados dichos resultados, se compararan con una simulación realizada en Matlab (modelo analítico) para comprobar (obteniendo los mismos resultados en ambos programas) que el modelo simplificado realizado con Working Model 2D es válido.

Finalmente el último objetivo es el análisis dinámico del robot Pasibot. Para ello se ha utilizado el mismo diseño realizado con Working Model 2D y así se han obtenido las reacciones de las piezas del robot Pasibot.

## **1.3.- Estructura.**

Este proyecto se divide en siete capítulos, a continuación se hará un breve resumen del contenido de cada capítulo:

- Capítulo 1: Objetivos y estructura del proyecto.

Trata en primer lugar la motivación por la cual se realiza este proyecto, además se identifican los dos objetivos claros del proyecto y por último se comenta la estructura del proyecto.

## ○ Capítulo 2: Introducción.

En primer lugar se hace una breve introducción a la robótica. En segundo lugar se hace una clasificación general de la robótica. En tercer lugar se analiza una evolución histórica de los robots bípedos (tanto robots pasivos como robots activos), destacando los más importantes y diferenciándolos por el lugar de creación.

## ○ Capítulo 3: Introducción a Working Model 2D y diseño del robot Pasibot en Working Model 2D.

En la primera parte de este capítulo se hablará del programa utilizado en este proyecto: Working Model 2D. Tanto la empresa creadora del programa, como las distintas evoluciones que ha tenido, las características más importantes y diferentes puntos de interés.

La segunda parte de dicho capítulo explica los diferentes pasos que se realizarán con Working Model 2D para realizar el diseño del robot Pasibot sobre el que se trabajará en este proyecto.

## ○ Capítulo 4: Análisis Cinemático del robot Pasibot.

Este capítulo se centrará en el estudio cinemático. En primer lugar obteniendo la posición, velocidad y aceleración de diferentes puntos del robot Pasibot cuando se encuentra en diferentes situaciones (casos). Los resultados se exportarán a Microsoft Excel y mediante figuras se comentarán los resultados.

Se compararán los resultados de WM 2D con un modelo analítico realizado en Matlab en colaboración con otro proyecto. Deben dar resultados semejantes para aprobar el modelo utilizado en WM 2D.

## ○ Capítulo 5: Análisis Dinámico del robot Pasibot.

Se analizarán diferentes piezas que forman el robot Pasibot desde el punto de vista dinámico, obteniendo las reacciones de las piezas que resulten de mayor interés. Estos resultados se exportarán de Working Model 2D a gráficos realizados con Microsoft Excel y se comentarán.

## ○ Capítulo 6: Conclusiones y futuros desarrollos.

Este capítulo resumirá las conclusiones que se pueden analizar de los diferentes resultados obtenidos en capítulos anteriores.

Además se harán comentarios para que a la hora de realizar futuros desarrollos se puedan tener más facilidades y obtener mejores resultados. Así como anotaciones que se podían haber realizado en este proyecto, pero como alargaría mucho el proyecto se dan para futuros desarrollos.

- Capítulo 7: Bibliografía.

En el último capítulo se detallaran los libros, páginas webs o cualquier otro documento utilizado para realizar este proyecto.

---

# Capítulo 2

**Introducción.**

## **2.1.- Introducción a la robótica.**

Según la Real Academia Española se define robot como “máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas” [1].

Una segunda definición explica que “un robot se define como una entidad hecha por el hombre con un cuerpo (anatomía) y una conexión de retroalimentación inteligente, entre el sentido y la acción, no bajo la acción directa del control humano. Sin embargo, se ha avanzado mucho en el campo de los robots con inteligencia artificial. Las acciones de este tipo de robots son generalmente llevadas a cabo por motores o actuadores que mueven extremidades o impulsan al robot. Asimismo, el término robot ha sido utilizado como un término general que define a una máquina mecánica o autómatas, que imita a un animal, ya sea real o imaginario, pero se ha venido aplicando a muchas máquinas que reemplazan directamente a un humano o animal en el trabajo o el juego. Esta definición podría implicar que un robot es una forma de biomimetismo” [2].

Si se realiza un estudio etimológico de la palabra *robótica*, la palabra "*robot*" viene del vocablo checo *robota*, que significa "*servidumbre*", "*trabajo forzado*" o "*esclavitud*", especialmente los llamados "*trabajadores alquilados*" que vivieron en el Imperio Austrohúngaro hasta el año 1848.

El término *robot* fue utilizado por primera vez por Karel Čapek en su obra teatral R.U.R. (*Rossum's Universal Robots*, fue escrita en colaboración con su hermano Josef en 1920; interpretada por primera vez en 1921; interpretada en Nueva York en 1922; la edición en inglés fue publicada en 1923). Aunque los robots de Čapek eran humanos artificiales orgánicos, la palabra robot es casi siempre utilizada para referirse a humanos mecánicos. El término androide puede referirse a cualquiera de éstos, mientras que un cyborg ("organismo cibernético" u "hombre biónico") puede ser una criatura que es la combinación de partes orgánicas y mecánicas.



A principios del siglo XVIII, Jacques de Vaucanson creó un androide que tocaba la flauta, así como un pato mecánico que continuamente comía y defecaba. En uno de los cuentos de Hoffmann del año 1817, *El Coco*, presenta una mujer que parecía una muñeca mecánica, y en la obra de Edward S. Ellis de 1865 *El Hombre de Vapor de las Praderas* se expresa la fascinación americana por la industrialización.

Hacia 1942, Isaac Asimov (figura 2.1) da una versión más humanizada a través de su famosa serie de relatos, en los que introduce por primera vez el término *robótica* con el sentido de disciplina científica encargada de construir y programar robots. Además, este autor plantea que las acciones que desarrolla un robot deben ser dirigidas por una serie de reglas morales, llamadas las *Tres Leyes de la Robótica* [2].

En ciencia ficción las *Tres Leyes de la Robótica* son un conjunto de normas escritas por Isaac Asimov, que la mayoría de los robots de sus novelas y cuentos están diseñados para cumplir. En el universo de la robótica, las leyes son "formulaciones matemáticas impresas en los senderos positrónicos del cerebro" de los robots (lo que en la actualidad se llamaría memoria ROM). Estas leyes aparecen por primera vez en el libro "*Runaround*" (1942).



**Figura 2.1: Isaac Asimov.**

Las *Tres Leyes de la Robótica* establecen lo siguiente [3]:

1. Un robot no debe dañar a un ser humano o, por su inacción, dejar que un ser humano sufra daño.

2. Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto si estas órdenes entran en conflicto con la Primera Ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, hasta donde esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley.

Esta redacción de las leyes es la forma convencional en la que los humanos de las historias las enuncian. Su forma real sería una serie de instrucciones equivalentes y mucho más complejas en el cerebro del robot.

Asimov atribuye las *Tres Leyes de la Robótica* a John W. Campbell, que las habría redactado durante una conversación sostenida el 23 de diciembre de 1940. Sin embargo, Campbell sostiene que Asimov ya las tenía pensadas, y que simplemente las expresaron entre los dos de una manera más formal.

Las 3 leyes aparecen en un gran número de historias de Asimov, ya que aparecen en toda su serie de los robots, así como en varias historias relacionadas, y la serie de novelas protagonizadas por Lucky Starr. También han sido utilizadas por otros autores cuando han trabajado en el universo de ficción de Asimov, y son frecuentes las referencias a ellas en otras obras, tanto de ciencia ficción como de otros géneros [3].

Por otra parte, desde la generalización del uso de la tecnología en procesos de producción con la Revolución Industrial se intentó la construcción de dispositivos automáticos que ayudasen o sustituyesen al hombre. Entre ellos destacaron los Jaquemarts, muñecos de dos o más posiciones que golpean campanas accionados por mecanismos de relojería china y japonesa [2].

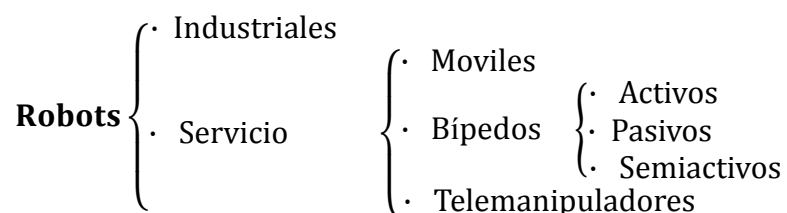
Otro tipo de robots equipados con una sola rueda fueron utilizados para llevar a cabo investigaciones sobre conducta, navegación y planificación de trayectorias. Cuando estuvieron listos, se pusieron manos a la obra para la creación de robots caminantes, comenzaron con pequeños hexápodos y otros tipos de robots de múltiples piernas. Estos robots imitaban insectos y artrópodos en funciones y forma. La tendencia se dirige hacia ese tipo de cuerpos que ofrecen gran flexibilidad y han probado adaptabilidad a cualquier ambiente. Con más de 4 patas, estos robots son estáticamente estables lo que hace que el trabajar con ellos sea más sencillo.

Sólo recientemente se han hecho progresos hacia los robots con locomoción bípeda que ofrecen más problemas de estabilidad y serán objeto de estudio en este proyecto.

En 2002 Honda y Sony, comenzaron a vender comercialmente robots humanoides como “ *mascotas*”. Los robots con forma de perro se encuentran, sin embargo, en una fase de producción muy amplia, el ejemplo más notorio ha sido Aibo de Sony [2].

## **2.2.- Clasificación y tipos de robots.**

La clasificación de los diferentes tipos de robots puede ser muy diferente según la orientación que se le dé a dicha clasificación. Para este proyecto y la orientación que tiene, se opina que la clasificación de los robots más oportuna es la siguiente:



Los dos grandes grupos en los que se pueden englobar todos los robots son los robots industriales y los robots de servicio. Por ello, se detalla a continuación una definición y las características más generales de cada grupo.

### ○ **Robots industriales:**

La definición de un robot industrial es un dispositivo de maniobra destinado a ser utilizado en la industria y dotado de uno o varios brazos (dependiendo de la función para la que ha sido creado), fácilmente programable para cumplir operaciones diversas con varios grados de libertad y destinado a sustituir la actividad física del hombre en las tareas repetitivas, monótonas, desagradables o peligrosas [4], [5], [6], [7].

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la *Asociación de Industrias Robóticas (RIA)*, según la cual un robot industrial es:

- Un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

La definición de la *RIA*, ha sido modificada ligeramente para poder ser aceptada por la *Organización Internacional de Estándares (ISO)*, que define al robot industrial como:

- Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.

En la definición de la *ISO*, a diferencia de la definición de la *RIA*, incluye la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad.

Otra definición más completa y actualizada es la establecida por la *Asociación Francesa de Normalización (AFNOR)*, que en primer lugar define el manipulador y, basándose en dicha definición, define el robot:

- Manipulador: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.
- Robot: manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

Por último, la *Federación Internacional de Robótica (IFR)* distingue entre robot industrial de manipulación y otros robots:

- Por robot industrial de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento.

En la definición de la *IFR*, se debe aclarar que para conseguir hacer el robot reprogramable y multifuncional no hace falta hacer modificaciones físicas al robot.

Una característica en común que tienen todas las definiciones es la aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Un sistema robotizado, en cambio, es un concepto más amplio. Engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno o varios robots, siendo esto último lo más frecuente.

El trabajo del robot normalmente se limita generalmente a pocos movimientos repetitivos de sus ejes. Éstos son casi siempre 3 para el cuerpo y 3 para la mano o puño, su radio de acción queda determinado por un sector circular en el espacio donde éste alcanza a actuar. Cuando las partes o piezas a manipular son idénticas entre sí y se presentan en la misma posición (por ejemplo en una cadena de montaje), los movimientos destinados a reubicar o montar partes se efectúan mediante dispositivos articulados que a menudo finalizan con pinzas.

La sucesión de los movimientos se ordena en función del fin que se persigue, siendo fundamental la memorización de las secuencias correspondientes a los diversos movimientos. Puede presentarse el caso en el que las piezas o partes a ser manipuladas no se presenten en posiciones prefijadas, en este caso el robot deberá poder reconocer la posición de la pieza y actuar u orientarse para operar sobre ella de forma correcta, es decir se le deberá proveer de un sistema de control adaptativo.

Entre las características que identifican a un robot se encuentran su volumen de trabajo y su configuración.

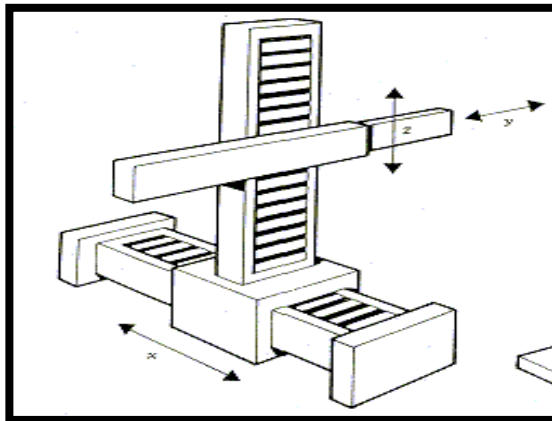
- El volumen de trabajo de un robot se refiere únicamente al espacio dentro del cual puede desplazarse el extremo de su muñeca.
- Cuando se habla de la configuración de un robot industrial se está hablando de la forma física que se le ha dado al brazo del robot.

Las configuraciones posibles son cuatro:

### 1. Configuración cartesiana.

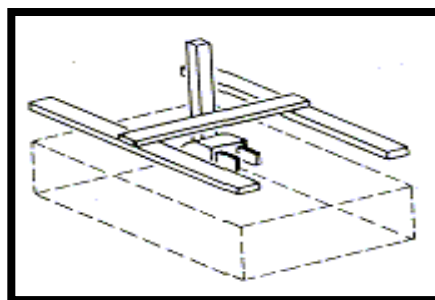
Posee tres movimientos lineales, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y, Z.

Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales.



**Figura 2.2: Configuración cartesiana.**

El robot cartesiano genera una figura de volumen de trabajo cúbica.

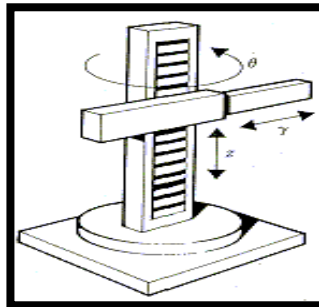


**Figura 2.3: Volumen de trabajo cúbico.**

### 2. Configuración cilíndrica.

Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, es decir, presenta tres grados de libertad.

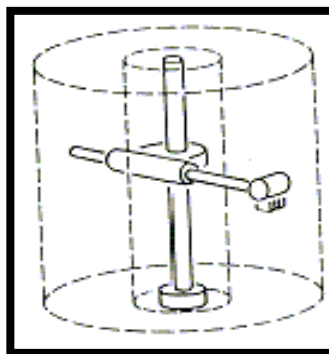
El robot de configuración cilíndrica está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación.



**Figura 2.4: Configuración cilíndrica.**

La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional.

El robot de configuración cilíndrica presenta un volumen de trabajo en forma de cilindro.

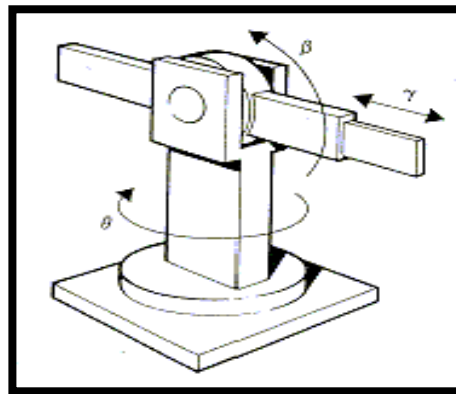


**Figura 2.5: Volumen de trabajo cilíndrico.**

### 3. Configuración polar.

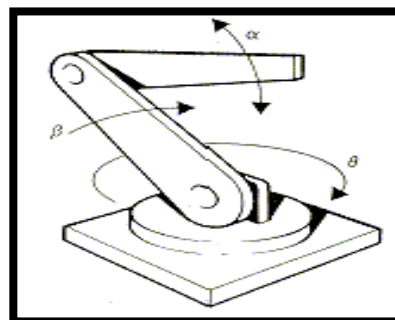
Tiene varias articulaciones. Cada una de ellas puede realizar un movimiento distinto: rotacional, angular y lineal.

Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción.



**Figura 2.6: Configuración polar.**

### 4. Configuración angular (o de brazo articulado).

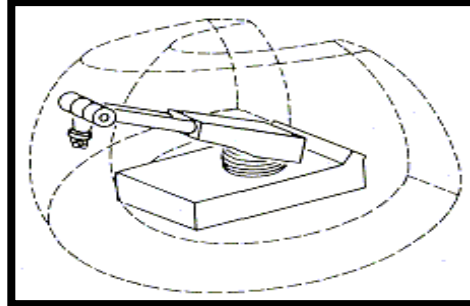


**Figura 2.7: Configuración angular.**

Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.



Por su parte, los robots que poseen una configuración polar y los de brazo articulado presentan un volumen de trabajo irregular.



**Figura 2.8: Volumen de trabajo irregular.**

Existen múltiples clasificaciones de los robots industriales atendiendo a diferentes criterios, pero las más destacadas son las siguientes:

➤ Clasificación en función del sistema de impulsión [4]:

- Impulsión hidráulica.

El sistema de impulsión hidráulica utiliza un fluido, generalmente un tipo de aceite, para que el robot pueda movilizar sus mecanismos. La impulsión hidráulica se utiliza para robots grandes, los cuales presentan mayor velocidad y mayor resistencia mecánica.

- Impulsión eléctrica.

El sistema de impulsión eléctrica utiliza la energía eléctrica para que el robot ejecute sus movimientos. La impulsión eléctrica se utiliza para robots de tamaño mediano. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetibilidad.

- Impulsión neumática.

En la impulsión neumática se comprime el aire abastecido por un compresor, el cual viaja a través de mangueras. Los robots pequeños están diseñados para funcionar por medio de la impulsión neumática. Están limitados a operaciones como la de tomar y situar ciertos elementos.

Es importante señalar que no todos los elementos que forman el robot pueden tener el mismo tipo de impulsión.

- Clasificación por prestaciones según la AFRI [5], [6], [8]:

**Tabla 2.1: Clasificación por prestaciones según la AFRI.**

Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimientos sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de éstos.

➤ Clasificación por generaciones [5], [6], [8]:

❖ 1ª Generación:

Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.

❖ 2ª Generación:

Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión), detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.

❖ 3ª Generación:

Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de sus tareas.

➤ Clasificación según la IFR [5], [6]:

La IFR distingue entre cuatro tipos de robots:

- 1.- Robot secuencial.
- 2.- Robot de trayectoria controlable.
- 3.- Robot adaptativo.
- 4.- Robot telemanipulador.

➤ Clasificación futurista según Knasel [5], [6], [8]:

**Tabla 2.2: Clasificación futurista según Knasel.**

Generación	Nombre	Tipo de control	Grado de movilidad	Usos más frecuentes
1ª (1982)	Pick & place	Fines de carrera, aprendizaje.	Ninguno.	Manipulación. Servicio de máquinas.
2ª (1984)	Servo	Servocontrol, trayectoria continua, programación condicional.	Desplazamiento por vía.	Soldadura. Pintura.
3ª (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto, programación off-line.	AGV. Guiado por vía.	Ensamblado. Desbarbado.
4ª (2000)	Móvil	Sensores inteligentes.	Patas. Ruedas.	Construcción. Mantenimiento.
5ª (2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA.	Andante. Saltarín.	Uso militar. Uso espacial.

- **Robots de servicio:**

Se entiende por robots de servicio a unos dispositivos electromecánicos móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa de ordenador y que realizan tareas no industriales, tareas de servicio [5], [8].

En esta definición tienen cabida, entre otros, los robots dedicados a cuidados médicos, educación, domésticos, de uso en oficinas, intervención en ambientes peligrosos, aplicaciones espaciales, aplicaciones submarinas y agricultura. Sin embargo, esta definición excluye a los telemanipuladores, ya que éstos están controlados directamente por el operador humano y no por un programa de ordenador [5].

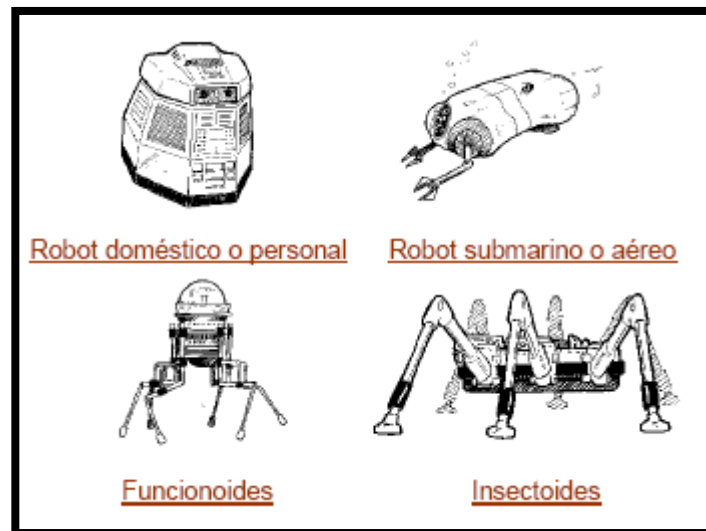


Figura 2.9: Algunos tipos de robots de servicio.

Entre los distintos tipos de robots de servicio que se pueden encontrar, los más destacados son:

➤ Móviles [9]:

Son robots con grandes capacidades de desplazamiento, basadas en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Siguen su camino por telemando o guiándose por la información recibida de su entorno a través de sus sensores.

Estos robots aseguran el transporte de piezas de un punto a otro de una cadena de fabricación. Se guían mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente. Pueden incluso llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.



Figura 2.10: Robot de servicio móvil.

### ➤ Bípedos [10]:

Son robots que disponen de dos piernas para desplazarse. Éstos se pueden clasificar en:

- Activos:

Se sirven de motores o actuadores para realizar el movimiento y el control.

- Pasivos:

Se sirven de su propio peso e inercia para realizar el movimiento y el control.

- Semiactivos:

Combinan características de movimiento y control de los dos tipos anteriores.

### ➤ Telemanipuladores [5], [8]:

Son dispositivos robóticos con brazos manipuladores, sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador.



Figura 2.11: Telemanipulador.

## **2.3.- Historia de los robots bípedos.**

Con el fin de conocer el objeto de estudio de este proyecto fin de carrera, los robots bípedos, a continuación se realiza un estudio cronológico de los robots bípedos que marcaron un antes y un después. Este estudio se ha dividido en dos grandes grupos diferenciados, por un lado robots bípedos pasivos y por otro lado robots bípedos activos o también llamados humanoides.

### ○ **Robots pasivos.**

Los robots dinámicos pasivos fueron inventados e inicialmente desarrollados por Tad McGeer entre 1988 y 1992 [11], [12], [13], [14], [15]. Estos mecanismos estaban inspirados en unos cálculos muy simples realizados una década antes por Tom McMahon en la Universidad de Harvard, que a su vez se basó en un juguete de los años 30, probablemente un “Wilson Walkie”, hecho de madera y tela, como puede verse en la figura 2.12.



Figura 2.12: Juguete de la década de los 30 del siglo XX denominado “Wilson Walkie”.

Wilson Walkie es un juguete denominado “Pingüino caminante en rampa”, patentado por John E. Wilson el 13 de diciembre de 1938 y fabricado por la empresa “Walter Toys” de Watertown (EEUU). Está fabricado de ojos de papel, y sus alas y cola están hechas de paño de aceite (figura 2.12), con una altura aproximada de 11,43 centímetros.

A continuación, en la figura 2.13, puede observarse el plano que Wilson presentó en la Oficina de Patentes de Estados Unidos para dejar constancia de su diseño [16].

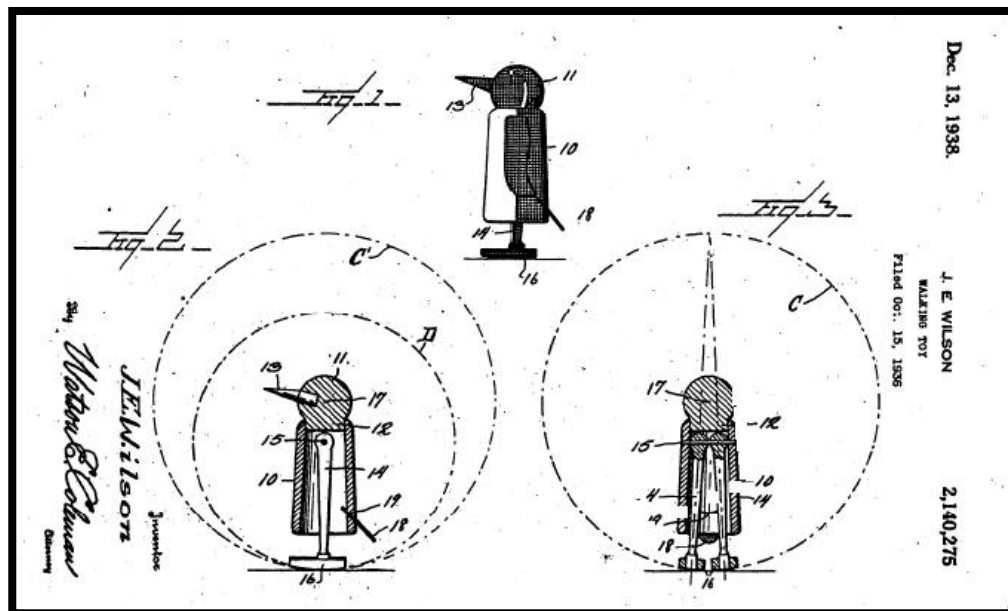


Figura 2.13: Plano original de la patente de Wilson Walkie.

El movimiento de Wilson Walkie se debía a que sus piernas giraban dentro de un cono de tal forma que cuando el juguete se colocaba en una rampa inclinada podía caminar sin necesidad de usar ningún actuador.

Tad McGeer es un ingeniero aeronáutico que hace varios años tuvo una excelente idea. Para desarrollarla, McGeer fundó el grupo *Insitu* donde se dedicó a producir naves robóticas en miniatura. La idea principal era desarrollar aparatos que no utilizaran mucha energía al moverse [17].



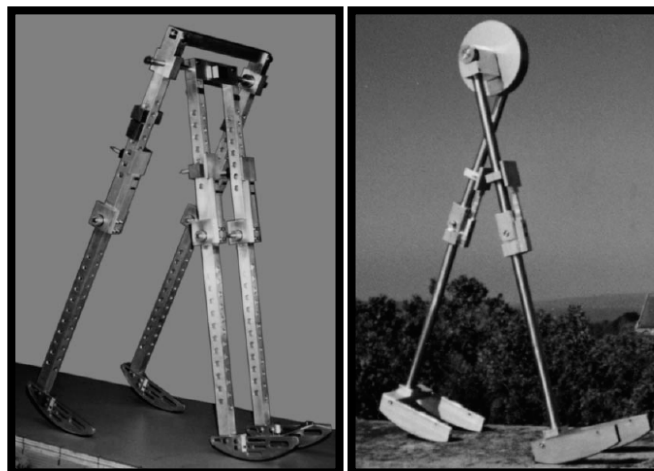
“Las primeras pruebas las hicimos con pequeñas máquinas que bajaban por una rampa sólo con la ayuda de la gravedad”. Esta máquina es el primer robot bípedo pasivo de la historia que partió del juguete Wilson Walkie.

“Desde ahí fuimos agregando más dinamismo y menos motores, así hemos cortado la energía utilizada”, expresó Steven Collins, ingeniero mecánico de la Universidad de Michigan y que colaboró con McGeer.

Los investigadores piensan que estos trabajos ayudarán en el entendimiento sobre la locomoción animal y la biomecánica de las piernas y los pies. “Esto nos ayudará a construir prótesis mucho más eficientes y que tomen menos esfuerzo para utilizar”, concluyó el investigador Collins [17].

Una vez que Tad McGeer creó el primer robot bípedo pasivo de la historia, se han realizado pocos avances. En concreto cinco son los robots bípedos pasivos que destacaron en la historia a partir del de McGeer.

El primero de ellos que destacó fue el modelo de Martin Wisse (ingeniero mecánico) que realizó en la Universidad de Cornell en el año 1998. Éste fue desarrollando y evolucionando el robot bípedo pasivo de McGeer con la ayuda de Andy Ruina (investigador). Construyendo finalmente un andador pasivo dinámico 3D con rodillas, basados en simulaciones en 2D. A continuación se puede observar la figura 2.14 con dicha evolución [18].



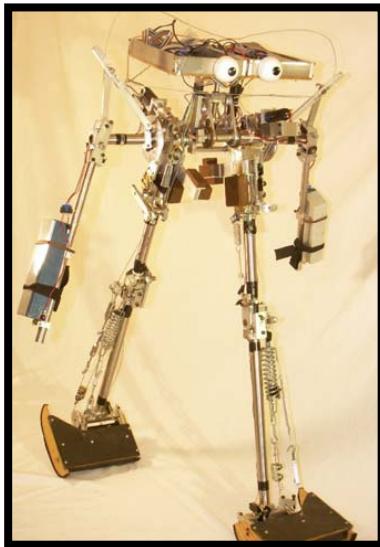
**Figura 2.14:** Evolución del robot bípedo pasivo de McGeer al robot de Wisse y Ruina.

En febrero del 2005 en la reunión anual de la *Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS)*, tres equipos de investigación de las universidades de *Cornell*, *MIT* y *Delft (Holanda)* lograron construir robots cuyos pasos y movimiento se parecen a la forma de andar de los humanos [17].

- Robot Ranger (Universidad de Cornell).
- Robot Toddlers (Universidad de MIT).
- Robot Denise (Universidad de Delft).

A continuación se comentan ciertas características de cada uno de los robots pasivos comentados anteriormente:

- Robot Ranger (Universidad de Cornell).



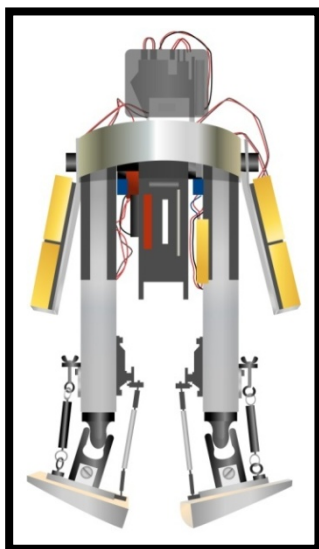
**Figura 2.15: Robot de la Universidad de Cornell.**

El robot bípedo llamado Ranger de la Universidad de Cornell mide un metro, tiene dos patas largas con articulaciones (caderas, rodillas y tobillos) dos brazos, una barra corta en lugar de torso y una caja plana por cabeza, donde va un pequeño microcontrolador y un par de baterías a cada lado. Los dos ojos protuberantes son dos cascarones de plástico: "Pura decoración", dice Andy Ruina, uno de los padres del engendro, cuyo interés reside en que imita mecánicamente muy bien el caminar humano, explotando eficazmente el equilibrio y la dinámica del balanceo natural, de manera que precisa muy poca energía para desplazarse. Ruina lo puso a andar en la pista cubierta de atletismo del campus de Cornell, dispuesto a batir un récord mundial.

Resulta estafalario y se balancea como una persona con muletas, pero no se cae: anduvo un kilómetro en círculos por la pista. Un logro sin precedentes. Sus pies "sienten" el suelo. "No es muy inteligente", reconoce Ruina. Eso es lo extraordinario. Destacar que él sólo es capaz de caminar hacia delante y pesa 11,804 kilogramos.

Ruina, Collins y Russ Tedrake (del Instituto de Tecnología de Massachusetts), presentaron sus robots rodeados de juguetes andarines como pingüinos, elefantes o monigotes de madera que se desplazan sobre rampas. Los juguetes eran importantes para explicar su trabajo: los robots que caminan sin pilas han existido desde hace mucho tiempo, pero sólo lo hacen en una superficie descendente, aprovechando el efecto de la gravedad. Sin embargo, cuando se quiere que un robot ande en un plano horizontal hay que proporcionarle una fuente de energía (baterías, red eléctrica o simplemente darle cuerda).

- Robot Toddlers (Universidad de MIT).



**Figura 2.16: Robot Toddlers.**

Los robots de MIT son conocidos como los “Toddlers”, pesan unos 2,27 kilogramos y miden 43 centímetros de alto. Son los más sofisticados ya que pueden caminar en otras direcciones. El robot desarrollado por el MIT también demuestra un sistema de aprendizaje nuevo, que permite que el robot se adapte de forma continua al terreno sobre el que se mueve. Estos nuevos avances en robótica podrían transformar los actuales sistemas de diseño y control de robots, y podrían ser aplicados al desarrollo de prótesis robóticas.

El robot del MIT utiliza un programa de aprendizaje que aprovecha dicho diseño y permite que el robot se enseñe a sí mismo a andar en menos de 20 minutos. Precisamente su apodo, "Toddlers" (el término inglés para un niño pequeño que empieza a andar) se deriva de su capacidad de aprender a andar y la forma en la que lo hace.

Este modelo de robot es uno de los primeros robots en utilizar un programa de aprendizaje y es el primero en andar sin tener información previamente implantada en sus controles. Además el sistema de aprendizaje permite que el robot se mueva con eficacia por una variedad de superficies y, en el futuro, podría permitir que se muevan por terreno muy rocoso. Esto se debe a que el programa funciona con tanta velocidad que el robot puede adaptarse de forma continua al tipo de terreno.

- Robot Denise (Universidad de Delft).



**Figura 2.17:**  
**Robot Denise.**

El robot de la Universidad Delft (Holanda) llamado Denise, con 7,264 kilogramos de peso y 1,5 metros de largo. Sólo camina hacia delante. La programación de los robots de Cornell y Delft es muy sencilla, porque gran parte del problema de los controles se soluciona a través del diseño mecánico del robot [17], [19], [20].

Por último se debe comentar uno más, además de los tres robots pasivos comentados. En junio del 2005 el Instituto Tecnológico de Nagoya creó un robot capaz de recorrer 4000 pasos en 35 minutos sin parar sobre una cinta transportadora. Sus creadores son Yoshito Ikemata, Akihito Sano y Hideo Fujimoto [21].



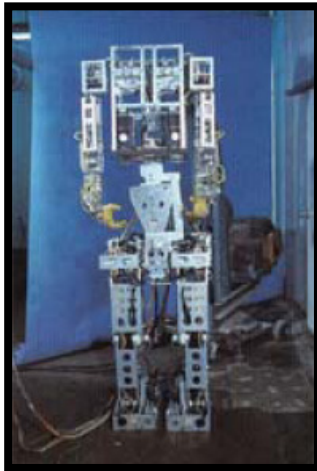
**Figura 2.18: Robot Nagoya (2005).**

- **Robots activos.**

La cronología de los robots bípedos activos o humanoides se diferencia según la empresa o la universidad en la que se haya fabricado, a continuación se nombran las más destacadas [22].

- “Universidad Waseda (J), Humanoid Robotics Institute (HRI)”

- WABOT-1



**Figura 2.19: Wabot-1.**

Fue el primer robot antropomorfo de diversión a escala desarrollado en el mundo. Fabricado en la Universidad de Waseda en 1973 por su creador Ichiro Kato.

Éste consistió en un sistema de control de miembro, un sistema de visión y un sistema de conversación. El Wabot-1 fue capaz de comunicarse con una persona en japonés, medir distancias y direcciones a los objetos usando receptores externos, oídos y ojos artificiales, y una boca artificial.

Wabot-1 anduvo con sus miembros inferiores y fue capaz de agarrar y transportar objetos con las manos que usaron el sensor táctil. Se estimaba que el Wabot-1 tenía la facultad de un niño de un año y medio [23].

- WABOT-2

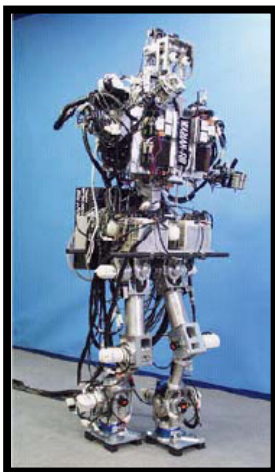


**Figura 2.20: Wabot-2.**

Fue creado entre los años 1980 y 1984. Se trata de un robot capaz de tocar un teclado musical, que se creó como una inteligente tarea que el Wabot-2 era capaz de realizar, ya que una actividad artística como jugar con un teclado o instrumento requeriría dotes humanas, como la inteligencia y la destreza. Por lo tanto, la Wabot-2 se define como un "robot especialista", en lugar de un versátil robot como el Wabot-1.

El robot músico Wabot-2 puede conversar con una persona, leer una partitura musical normal con los ojos y jugar con un juego de melodías de dificultad media en un órgano electrónico. El Wabot-2 también es capaz de acompañar a una persona mientras escucha a la persona que cante. El Wabot-2 fue el primer hito en el desarrollo de un "robot personal" [17].

- WABIAN



**Figura 2.21: Wabian.**

Este robot fue desarrollado en 1997. Tiene 1,662 metros de altura y un peso total de 107 kg, tiene capacidad de levantar 30 kg de peso en el hombro y 1,5 kg en la mano.

Las características mecánicas del modelo son: la cabeza con la función de adquisición de la información audiovisual; el sistema mano-brazo, que también contribuye a la estabilización al caminar; caminar con todos los equipos de control de a bordo, con exclusión de la fuente de alimentación.



En los hogares la corriente alterna se utiliza como fuente de energía. La cabeza y el ojo del robot, fue desarrollado por su creador y otros colaboradores en 1995. Como resultado de ello, también es posible que el robot tenga las capacidades de audio y de diálogo [25].

- WABIAN-2



**Figura 2.22: Wabian-2.**

El Wabian-2 es el último robot creado por la Universidad de Waseda, las características son una altura de 1,475 metros y un peso de 64,5 kilogramos.

Este robot fue creado con el fin de desarrollar las diversas propuestas que tiene el ser humano por lo general.

La gama de movilidad está diseñada en referencia al movimiento humano.

En el pie de dicho robot al caminar, su talón y la puntilla llegan a la tierra al mismo tiempo. Así para el robot es difícil realizar pasos largos e imitar el caminar de los humanos.

Para resolver este problema se desarrolló un nuevo sistema de pies con un dedo pasivo basado en los pasos humanos analizados por un sistema de captura de movimiento.

Este robot es controlado por un ordenador montado en su cuerpo. El ordenador de control consiste en una tarjeta PCI CPU [26].

➤ Honda

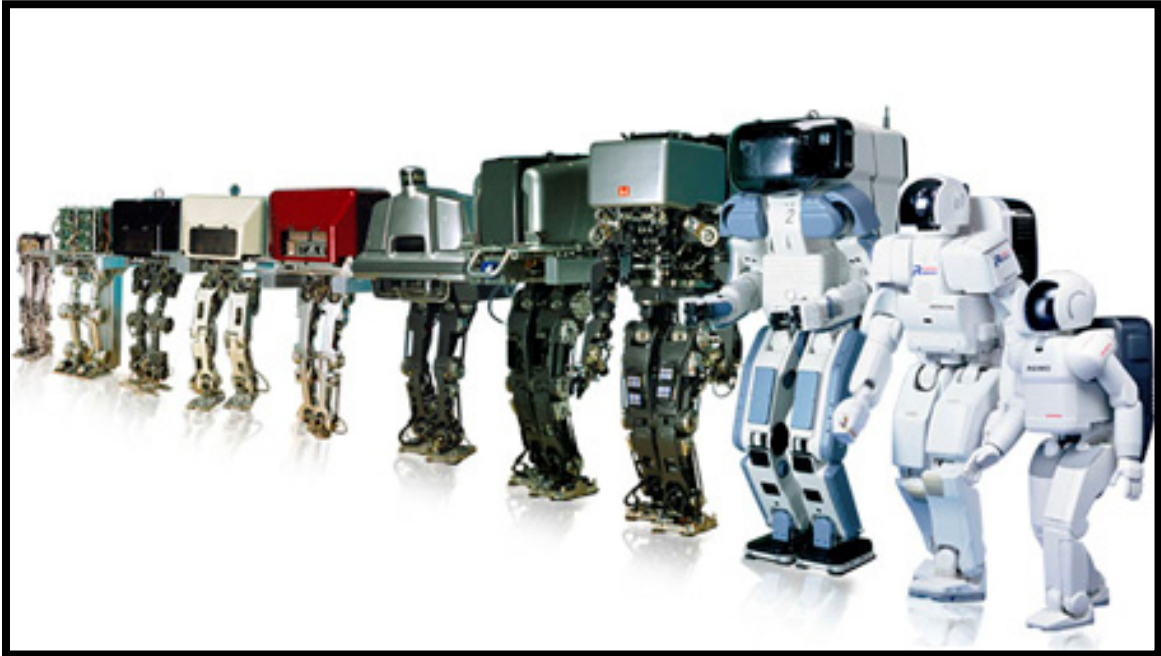
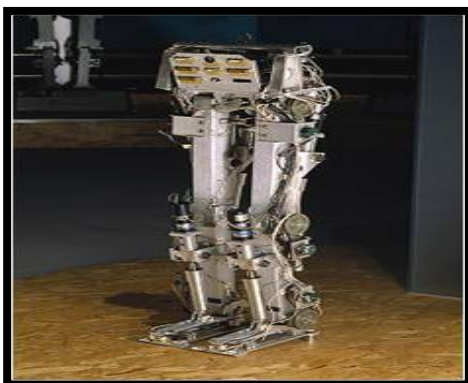


Figura 2.23: Evolución de los robots humanoides de Honda.

De todos los robot humanoides que se pueden apreciar en la figura 2.23 solo se van a destacar los más importantes.

○ E0



Es el primer robot humanoide que anda creado por la empresa Honda en el año 1986.

Era capaz de andar en línea recta, pero tardaba cerca de 5 segundos entre cada paso [27].

Figura 2.24: E0 de Honda (1986).



### ○ E5



Figura 2.25: E5 de Honda (1992).

La compañía Honda creó una evolución del humanoide anterior denominada E5 en el año 1992.

El E5 no introdujo mejoras sustanciales en la forma de desplazarse pero se convirtió en todo un hito al ser el primer modelo autónomo de la compañía japonesa [27].

### ○ P2



Figura 2.26: P2 de Honda (1995).

Fue creado por Honda en el año 1995.

Hizo su debut en público en Diciembre de 1996.

Media 1,82 m. y pesaba 210 kg.

Su torso contenía un ordenador, motores, la batería, una radio y otros controles para permitir un control inalámbrico [28].

- P3



**Figura 2.27: P3 de honda (1997).**

Honda finalizó el P3 en el año 1997, que consistía en una evolución del robot humanoide P2.

Fue el primer robot humanoide bípedo totalmente autónomo.

Tiene una altura de 1,60 m. y un peso 130 kg.

El peso se redujo considerablemente gracias al cambio de materiales y el hecho de descentralizar el sistema de control.

Este tamaño lo hacía más adaptado para las actividades humanas [28].

- Asimo

Asimo es el último y más famoso robot humanoide creado por Honda. Su primera versión apareció en el año 2000 y hasta la actualidad han ido apareciendo numerosas evoluciones.

ASIMO = *Advanced Step in Innovative MObility*, es decir, 'paso avanzado en movilidad innovadora'. Su nombre, pronunciado en Japonés “ashimo”, significa “piernas también”.

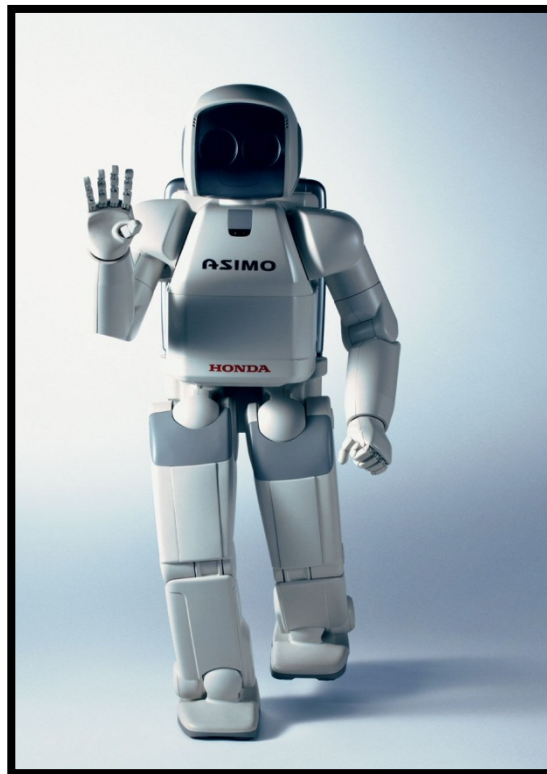
La versión X2 (año 2002) poseía un avanzado sistema de reconocimiento facial así como de gestos y movimientos.

En la versión del año 2004, se logró que pudiera correr a 3 Km/h y se le añadieron pulgares con sentido del tacto para detectar cuando le cogían de la mano.

En la versión del año 2005, se logró la capacidad de correr a 6 Km/h. Con una altura de 1,20 m y un peso de 54 kg le hace óptimo para realizar actividades como repartir café, empujar carritos o entregar mensajes. Pudiendo realizar estas actividades sin parecer demasiado grande y amenazante.

Era capaz de interactuar con los humanos, al tiempo que se trataba del robot que más rápido era en realizar sus movimientos.

A finales del año 2007, son dos las novedades que presenta Asimo, este robot que va siendo mejorado en cada nueva versión. La primera es que actualmente ya es capaz de desarrollar trabajo en equipo con otros robots como él, y la otra es que su forma de moverse entre personas resulta más óptima [28], [29].



**Figura 2.28: Asimo (2000-Actualidad).**

Algunas especificaciones técnicas de la versión anterior al 2007 y en comparación con la última versión:

- 1) Velocidad al correr: 3 Km/hora (tiempo en el aire: 0,05 segundos).
- 2) Velocidad normal al andar: modelo anterior, 1,6 Km/h; nuevo modelo, 2,5 Km/h.
- 3) Altura: 1,30 m. (modelo actual: 1,20 m.).
- 4) Peso: 54 kg (modelo actual: 52 kg).
- 5) Tiempo de funcionamiento continuo: 1 hora (modelo actual: 30 minutos).
- 6) Grados de libertad en funcionamiento: 34 grados de libertad en total (modelo actual: total, 26).

Otras características interesantes que se han obtenido en la última versión son:

- Articulación de rotación de cadera: Se ha conseguido una mayor velocidad al andar gracias a la rotación proactiva de las caderas, además del balanceo de los brazos, que contrarrestan la fuerza de reacción que se genera cuando las piernas avanzan al correr o andar.
- Articulación de flexión de la muñeca: Dos ejes adicionales en cada muñeca permiten que el movimiento de la zona de la muñeca sea más flexible.
- Articulación del pulgar: Antes, los cinco dedos funcionaban con un mismo motor. Ahora, con la adición de un motor que acciona el pulgar de forma independiente, Asimo puede sostener objetos de varias formas.
- Articulación del cuello: Se ha mejorado la expresividad de Asimo utilizando un eje adicional en la articulación del cuello [30].

### ➤ Universidad de Kawada y AIST

#### ○ HRP-2P

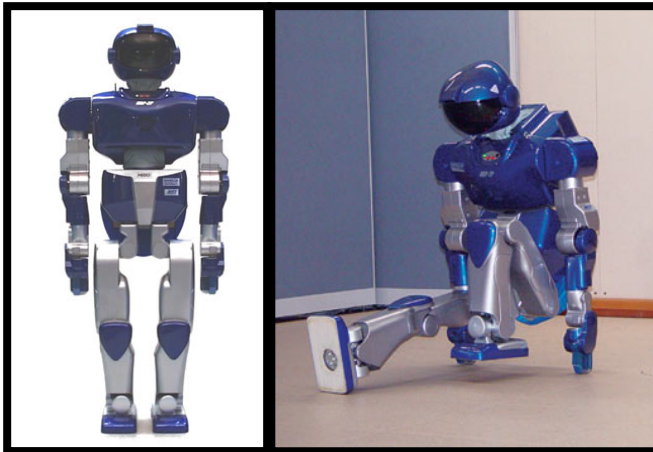


Figura 2.29: HRP-2P.

Fue creado por la Universidad de Kawada y AIST entre los años 2003 y 2004.

HRP-2P (Humanoid Robotics Project-2 Prototype) es ágil y su creador Kawada dice que será bueno para algo más que el entretenimiento.

Diseñado para hacer trabajo útil. Funciona con una versión tiempo real de Linux, llamada ART-Linux.

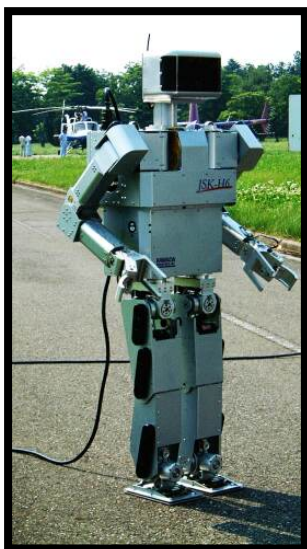
HRP-2P fue diseñado para parecer un humano, con similares grados de libertad en sus brazos y piernas. El HRP-2P de color plateado y azul mide 1,54 m. de alto y pesa 58 kg [31].

### ➤ Universidad de Tokio

#### ○ H6

Este robot fue creado en el año 2001 por la Universidad de Tokio.

La construcción del primer prototipo se terminó en junio de 2000 por el Departamento de Aviones y Mecánica de la División de Sistemas de Kawada Industries.



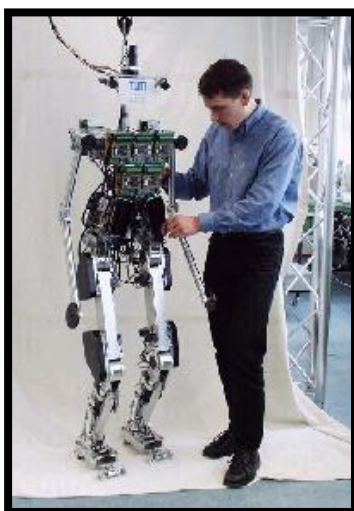
**Figura 2.30: H6 (2001).**

La altura del robot es 1,370 m., el ancho es 0,590 m. y la masa es 55 kg incluyendo baterías de 4 kg. El robot dispone de un total de 35 grados de libertad (DOF): 6 de cada pierna, 1 para cada pie (dedo del pie conjunta), 7 de cada brazo, 1 para cada pinza, 2 para el cuello, y 3 para los ojos.

Todas las grandes articulaciones están impulsadas por motores DC. A bordo dispone de un PC equipado con dos procesadores PentiumIII-750MHz con un sistema operativo RT-Linux, que se utiliza para el servidor en tiempo real y el equilibrio de compensación, así como de la coordinación de alto nivel y la visión en 3D del movimiento de componentes de software de planificación de los módulos. El sistema está conectado a la red inalámbrica a través de ethernet. Así, el robot es totalmente autónomo (que se puede manejar sin ningún tipo de cables externos) [32].

### ➤ Universidad de Munich

#### ○ Johnnie



**Figura 2.31: Johnnie (2001).**

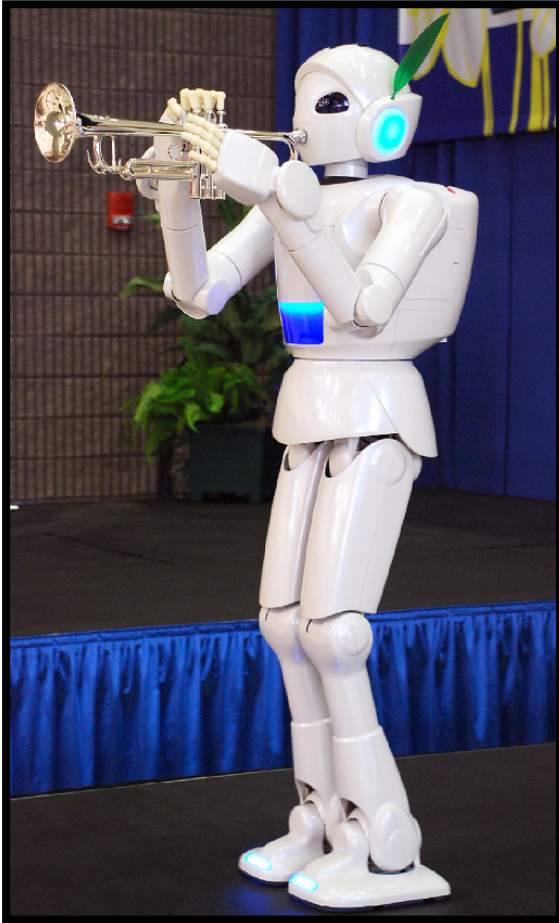
Este robot fue desarrollado por el Instituto de Mecánica Aplicada de la Universidad de Munich en el año 2001.

Es un robot que posee 17 transmisiones de tipo HD. El robot mide 1,8 metros y anda a una velocidad de 2 kilómetros por hora con un peso de 45 kg [33].



### ➤ Toyota

#### ○ Partner



**Figura 2.32: Partner (2004).**

La empresa Toyota creó el robot humanoide Partner en el año 2004.

La empresa Toyota presentó un robot humanoide capaz de interpretar con una trompeta 'When you wish upon a star', de la película Pinocho. El objetivo era formar una orquesta de robots para la Exposición Universal de Aichi de 2005 comentó su presidente, Fujio Cho.

El robot mide 1,20 m. de altura y pesa 35 kg, puede mover los labios sutilmente mientras el aire pasa a través de ellos y presiona con las manos los pistones.

Otro de los robots de la serie "Toyota Partner Robot" es del tamaño de una persona, mide 1,80 metros de altura y asemeja un asiento con piernas mecánicas

capaz de cargar y transportar a una persona.

En el proyecto colaboran las empresas japonesas NEC, de la industria informática, y el fabricante de micromotores Yasukawa Electric [34].

➤ Sony

○ QRIO



**Figura 2.33: Qrio (2004).**

En marzo del 2004 la empresa Sony creó Qrio (sucesor de Aibo, el perro mascota).

Algunas de las características más destacadas de este humanoide son:

- Es capaz de caminar sobre dos piernas incluso por superficies irregulares y rugosas.
- Se pone de pie tras una caída.
- Tiene sentido del equilibrio y detecta fuerzas externas (balancines).
- Equipado con 7 micrófonos es capaz de reconocer voces y su procedencia.
- Sus ojos son dos cámaras que le dotan de visión estereoscópica (le permite calcular la distancia y la posición de los objetos).
- Puede mantener conversaciones y utiliza lenguaje corporal para expresarse.
- Conectable a Internet por wireless [35].



## ➤ Universidad Carlos III de Madrid

### ○ Rh-0 y Rh-1

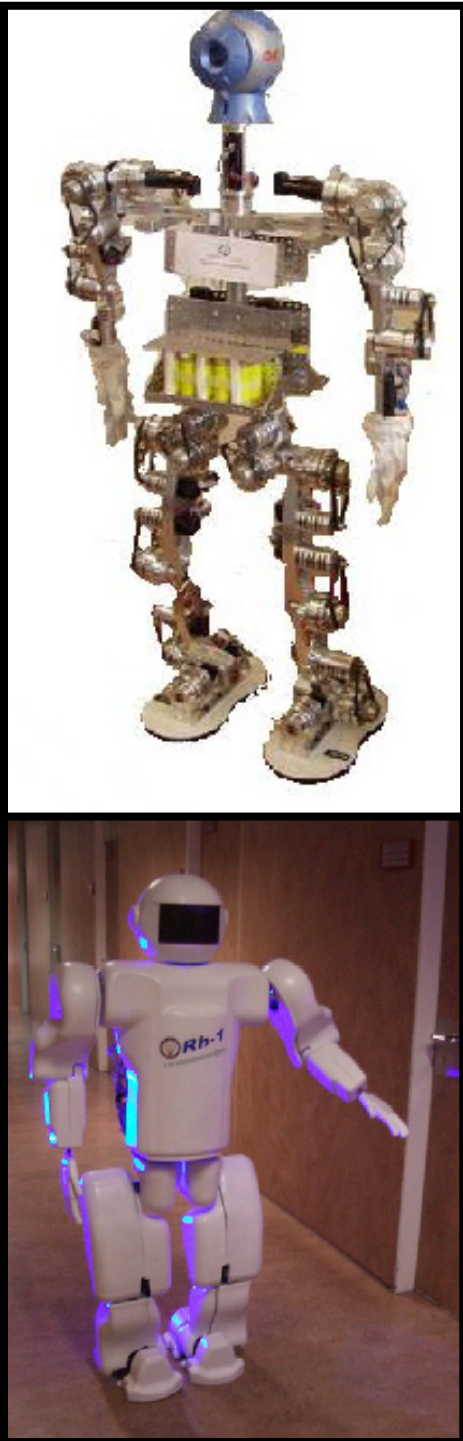


Figura 2.34: Rh-0 (2004) y Rh-1 (2007).

Los robots Rh-0 y Rh-1 que se diferencian prácticamente en el año de fabricación: el Rh-0 (2004) y el Rh-1 (2007). La principal característica es que el Rh-1 incorpora una carcasa que el Rh-0 no incorpora.

Las características comunes son:

- Tamaño natural: 1,5 m.
- Peso: 50 kg incluidas baterías.
- Dispone de 21 grados de libertad:
  - 6 GDL en cada pierna.
  - 3 GDL en cada brazo.
  - 1 GDL en la cabeza.
- 2 ordenadores a bordo.
- 2 CanBus de comunicación.
- Sensores a bordo:
  - 2 Fuerza/Par en los brazos. 3 inclinómetros. 3 acelerómetros.
- Conexión wi-fi [22].

---

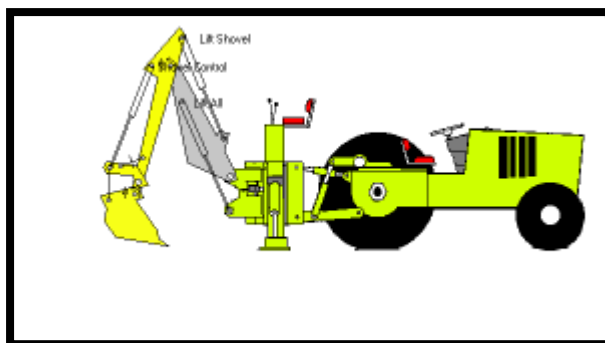
# Capítulo 3

**Introducción a Working Model 2D y  
diseño del robot Pasibot en Working  
Model 2D.**

### **3.1.- Introducción al Working Model 2D.**

#### Descripción de Working Model 2D.

Working Model 2D (WM 2D) es una herramienta de CAE (Computer Aided Engineering) que permite crear simulaciones de sistemas mecánicos reales y reducir el tiempo de creación de un producto, mejorando la calidad final y optimizando los cálculos. Es una herramienta adoptada por miles de ingenieros profesionales para crear y analizar los sistemas mecánicos reales [36].



**Figura 3.1: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.**

#### Historia del Working Model.

Working Model es la evolución de un programa denominado Interactive Physics. Ambos programas fueron creados por la compañía MSC Software Corporation [37].

Interactive Physics fue nombrado por primera vez así en el año 1989. Anteriormente se llamó Knowledge Revolution que pasó a llamarse Fun Physics en 1988 y finalmente Interactive Physics (IP) en 1989. Actualmente se distribuye en todo el mundo en siete idiomas y es el estándar en la simulación de movimiento para la física newtoniana. La última versión de IP fue creada en el año 2000.

El programa Working Model fue publicado por primera vez en 1993 para la Comunidad de Ingeniería. Fue creado mediante la adición de funcionalidades de ingeniería a Interactive Physics e importando dibujos DXF de paquetes de CAD, como AUTOCAD.

Working Model pasó a llamarse Working Model 2D en el año 1996 con el lanzamiento de la cuarta versión. La última versión de Working Model 2D fue creada en el año 1999.

La versión del programa Working Model 3D llegó a denominarse así en el año 1996. Cuando la compañía MSC Software Corporation adquirió Knowledge Revolution en 1999, la capacidad dinámica FEA fue añadida y nació el Working Model 4D.

La última versión de Working Model que ha salido en el mercado ha sido en el año 2005 [37].

### Información del fabricante.

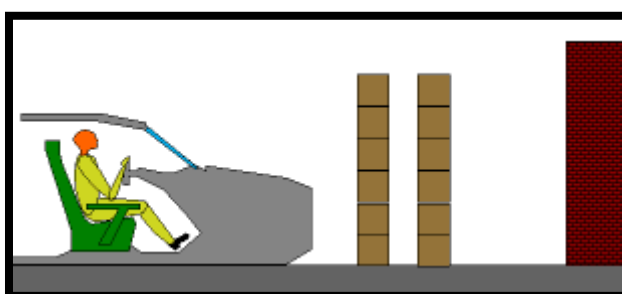
MSC Software Corporation es el fabricante de Working Model, es una empresa americana especializada en productos de simulación. Cuenta con motores de simulación propios que se pueden aplicar a casi todo tipo de problemas de simulación industrial. Esta empresa cuenta con más de 1.200 empleados en 22 países que se encargan de realizar proyectos de simulación a medida, ingeniería a través de la Web, etc. Sus productos se destinan a la industria aeronáutica, automoción, informática, electrónica y educación [38].

### Visión general.

WM incluye detección automática de colisión y respuestas para la geometría NURBS (acrónimo inglés de *Non Uniform Rational B-Splines*). Además se ha incluido 'scripts' como Flexbeam, Shear y Bending Moment, así como Pin Friction. Estos 'scripts' se han diseñado a medida para ampliar el uso de esta herramienta.

En cada etapa del ciclo de desarrollo, Working Model ayuda a la mejora del producto, permitiendo reducir el tiempo de diseño y, en consecuencia, ahorrar costes. Se puede interaccionar con los controles mientras la simulación sigue funcionando para, por ejemplo, cambiar la ganancia de un controlador PID en un problema de equilibrio de energía.

También permite la visualización de las simulaciones con gran variedad de representaciones como vectores animados, barras de líneas, medidas métricas, etc.



**Figura 3.2: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.**

### Características Principales de WM.

- Analiza el último diseño midiendo fuerza, par, aceleración, etc., e interaccionando con cualquier objeto.
- Permite la entrada de valores desde: ecuaciones, barras deslizantes o conectores DDE a Matlab y Excel.
- Realiza simulaciones no lineales.
- Permite la creación de cuerpos y puede definir propiedades, velocidad inicial, cargas electrostáticas, etc.
- Simula contactos, colisiones y fricción.
- Graba los datos de la simulación y crea gráficos de barra o vídeos en formato AVI [38].

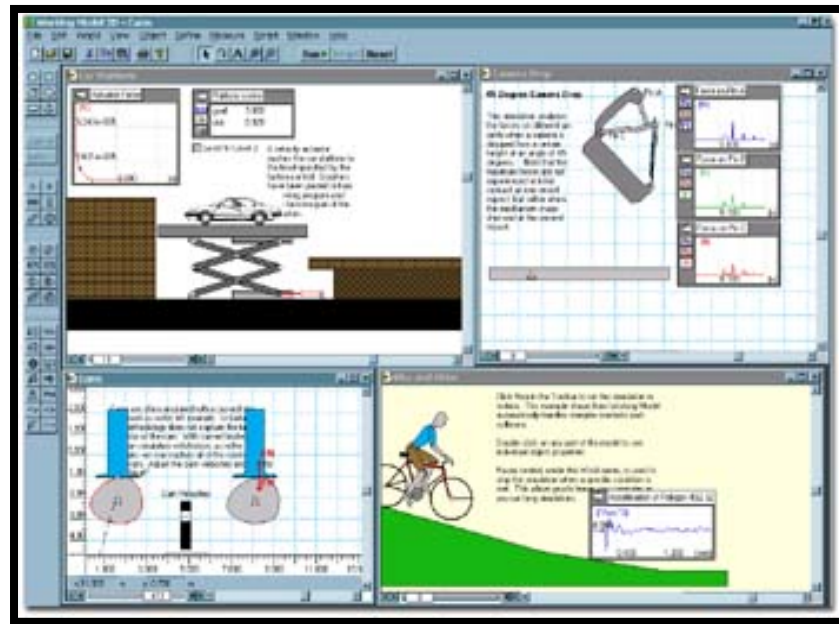


Figura 3.3: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.

### Características que incluyen las versiones más avanzadas.

- Importación de modelos complejos en formato DXF [39].
- Nuevas librerías DLL que mejoran la precisión de los cálculos.
- Pueden incluirse sonidos en la simulación en formato WAV.
- Demostración introductoria paso a paso para usuarios noveles.
- Exporta simulaciones al formato de vídeo de AVI para las presentaciones.
- DC Motor y DC Actuador. Modela Motores DC y actuadores DC con los siguientes parámetros: Resistencia Motor (R), Inductancia Motor (L), Motor Back-EMF Velocidad Constante (Kv), Fuerza/Par motor Constante (Km) y Motor Input Voltaje (Vi) [5].
- El color de los cuerpos puede ser ligado a una fórmula y variar con el tiempo, la velocidad, la fuerza...

## Otras características.

### ➤ **Propiedades de los cuerpos y características**

- Tipos de cuerpos: círculos, rectángulos, polígonos y cuerpos suaves (b-Spline) [38].
- Masa, densidad, geometría, centro de masa, momento de inercia, velocidad y velocidad angular, carga electrostática y más.
- Seguimiento de la trayectoria del movimiento de los cuerpos.
- Detección y respuesta automática de colisiones.
- Aplicación automática de fricción estática y cinética.

### ➤ **Restricciones**

Articulaciones con ranura, clavijas, rígidas, curvas y con cerrojo. Barras, sogas, poleas y engranajes. Resortes y amortiguadores lineales y rotatorios.

### ➤ **Generadores de movimiento**

Se puede generar movimiento mediante: motores, actuadores y fuerzas.

Las restricciones y los generadores de movimiento pueden ser definidos numéricamente o por ecuaciones en el editor de fórmulas o con datos en tablas.

### ➤ **Parámetros medibles**

Los parámetros que se pueden medir son: posición, velocidad, aceleración, momento, momento angular, fuerza, par, gravedad, electrostática, fuerza del aire, energía cinética, energía potencial gravitatoria.

Permite registrar y desplegar datos de las simulaciones en tiempo real con medidores gráficos y digitales.

### ➤ **Control de simulaciones**

Ejecutar, detener, reajustar, por pasos o pausar la simulación en cualquier momento.

Control de la precisión de la simulación a través del intervalo de integración y animación así como la configuración de tolerancia.

Superposición de múltiples simulaciones.

### ➤ Visualización

Seguimiento de la trayectoria del movimiento de un cuerpo o su centro de masa. Capacidad de adjuntar imágenes a los cuerpos. Se puede rotar imágenes sobre cuerpos. Se puede desplegar el centro de masa del sistema.

### ➤ Salida

- Archivos de video AVI.
- Datos de los medidores a archivos de datos en forma de tablas.

### ➤ Impresión

- Imprimir una imagen de la simulación o datos de los medidores.

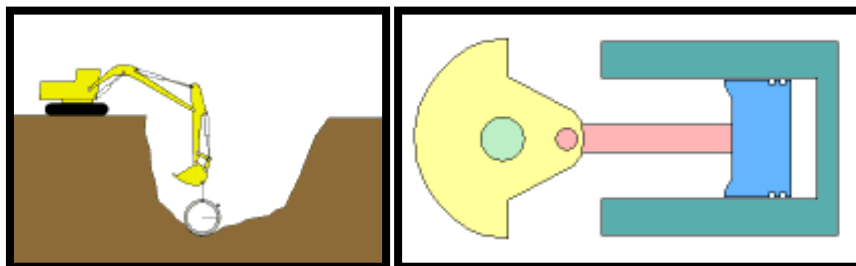


Figura 3.4: Ejemplo de diseño con Working Model 2D.

### Áreas de aplicación.

- Educación: simulación de todo tipo de problemas mecánicos.
- Ingeniería mecánica y eléctrica.
- CAD: diseño de sólidos en movimiento [38].



### Experimentos famosos con el uso de Working Model.

La NASA JPL utiliza el Working Model 2D y 3D para “*Mision Asteroid*” con el Japanese Space Institute. El JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) de la NASA está utilizando la simulación de movimientos del Working Model, para desarrollar, probar, e integrar un vehículo autónomo [41].

El Dr. Baumgartner ha estado utilizando Working Model 2D Y 3D para visualizar el funcionamiento mecánico del vehículo en la superficie de un asteroide (dando condiciones que tengan en común los asteroides: baja gravedad,...). El programa WM permite a ingenieros realizar estudios del proyecto sin prototipos [41].

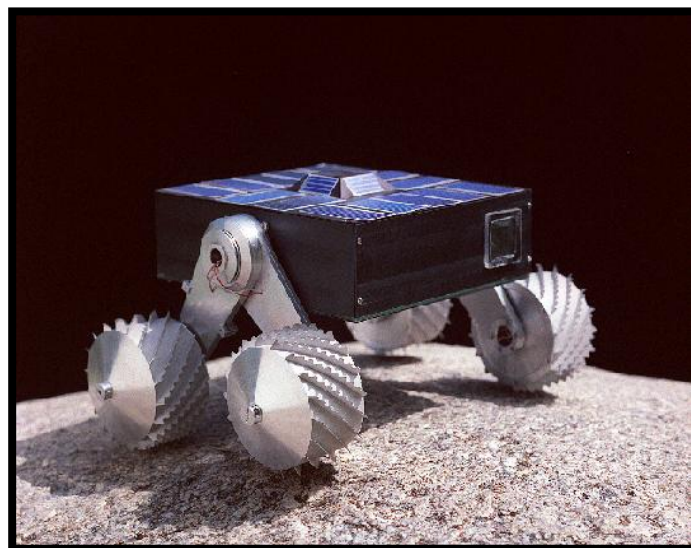
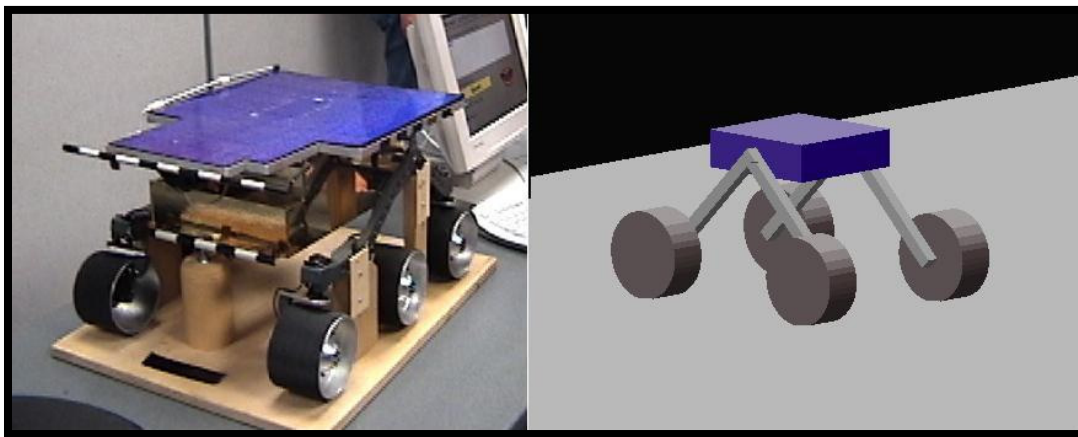


Figura 3.5: Ejemplo de diseño con Working Model 2D y sistema real.

## **3.2.- Diseño del robot Pasibot con Working Model 2D.**

Para los estudios del robot Pasibot que se verán más adelante (análisis cinemático y dinámico en los capítulos 4 y 5 respectivamente) se ha realizado una reconstrucción del mismo, diseñando cada pieza por separado con Working Model 2D. El prototipo final sobre el que se ha realizado los estudios ha sido facilitado por miembros del grupo de investigación MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid.

De ahora en adelante se establece una serie de nombres que se refieren a cada pieza del robot Pasibot. Estos nombres se emplearán de manera constante para saber a qué pieza del robot Pasibot se está refiriendo.

La denominación de cada pieza del robot Pasibot ha sido proporcionada por el mismo grupo MAQLAB.

En la figura 3.6 se indican los nombres que se han establecido para cada pieza del robot Pasibot.

El diseño del robot Pasibot se divide principalmente en cinco pasos:

- 1) Diseño de los eslabones.
- 2) Diseño de la Cadera.
- 3) Motor.
- 4) Uniones.
- 5) Conexiones.

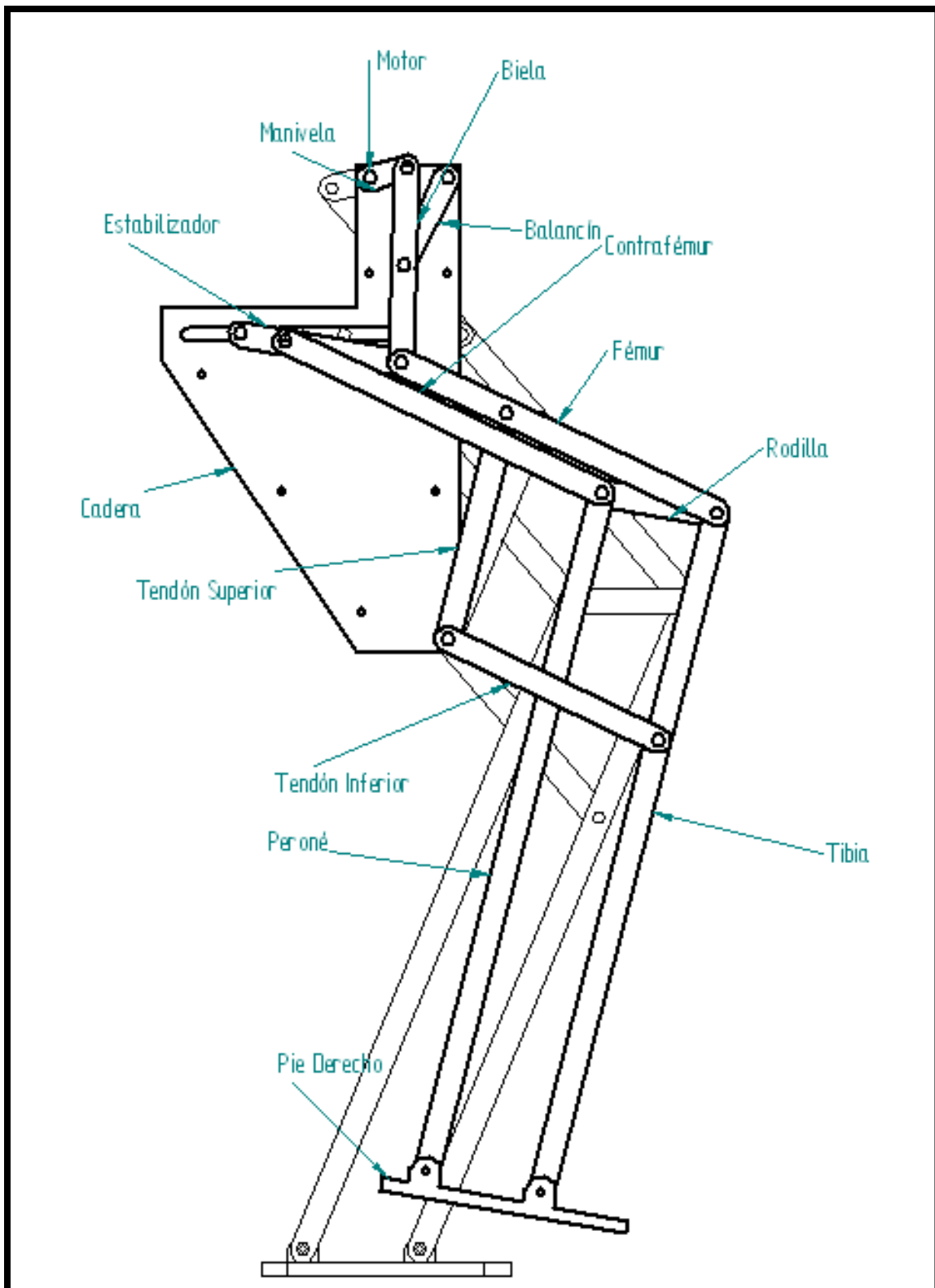
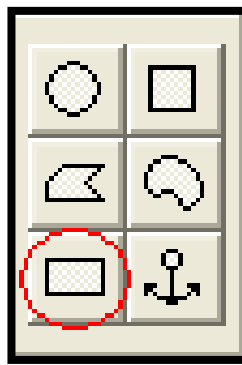


Figura 3.6: Denominación de las piezas que componen el robot Pasibot.

A continuación se muestra los pasos realizados:

### 1) Diseño de los eslabones.

El robot Pasibot consta de 23 eslabones diseñados como barras con WM. Su diseño es muy sencillo, se selecciona el botón “*Rectangle*” que diseña un rectángulo en Working Model 2D, se representa el botón en la figura 3.7:

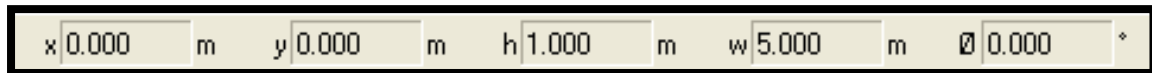


**Figura 3.7: Botón que diseña un rectángulo en Working Model 2D.**

Después se diseña un rectángulo cualquiera (no importa su tamaño ya que se variará). Después Working Model proporciona una barra en la parte inferior de la pantalla que proporciona las características que permiten modelar al rectángulo que se tenga previamente señalado. Son las siguientes (ver figura 3.8):

- Posición en el eje X (x).
- Posición en el eje Y (y).
- Altura de la pieza (h).
- Anchura de la pieza (w).
- Angulo que forma respecto a la horizontal ( $\Phi$ ).

Éstas son las características que se pueden modificar del rectángulo. Las unidades que se usan en este caso son metros para las longitudes y grados para el ángulo.



**Figura 3.8: Variación de las coordenadas y las dimensiones de la pieza seleccionada.**

A continuación (ver figura 3.9) se expresa la denominaciones de las dimensiones de los eslabones de cada barra del robot Pasibot y en la tabla 3.1 se muestran las dimensiones necesarias para el diseño de cada una de ellas en Working Model 2D.



**Figura 3.9: Denominaciones de las dimensiones de los eslabones del robot Pasibot.**

**Tabla 3. 1: Dimensiones de los eslabones del robot Pasibot.**

Pierna	Denominación	Altura [m]	Anchura [m]
Derecha	Pie	0,192	0,020
Izquierda	Pie	0,192	0,020
Derecha	Tibia	0,540	0,020
Izquierda	Tibia	0,540	0,020
Derecha	Peroné	0,540	0,020
Izquierda	Peroné	0,540	0,020
Derecha	Rodilla	0,090	0,020
Izquierda	Rodilla	0,090	0,020
Derecha	Tendón Inferior	0,180	0,020
Izquierda	Tendón Inferior	0,180	0,020
Derecha	Tendón Superior	0,180	0,020
Izquierda	Tendón Superior	0,180	0,020
Derecha	Fémur	0,270	0,020
Izquierda	Fémur	0,270	0,020
Derecha	Contrafémur	0,270	0,020
Izquierda	Contrafémur	0,270	0,020
Derecha	Estabilizador	0,125	0,020
Izquierda	Estabilizador	0,125	0,020
Derecha	Biela	0,150	0,020
Izquierda	Biela	0,150	0,020
Derecha	Balancín	0,075	0,020
Izquierda	Balancín	0,075	0,020
	Manivela	0,060	0,020

### 2) Diseño de la Cadera.

El diseño de la Cadera es un polígono irregular, su diseño se ha realizado de forma manual señalando los puntos en la cuadrícula que proporciona Working Model 2D. Esos puntos serán los vértices de la Cadera y el programa directamente unirá con rectas entre cada vértice según el orden en que se hayan creado.

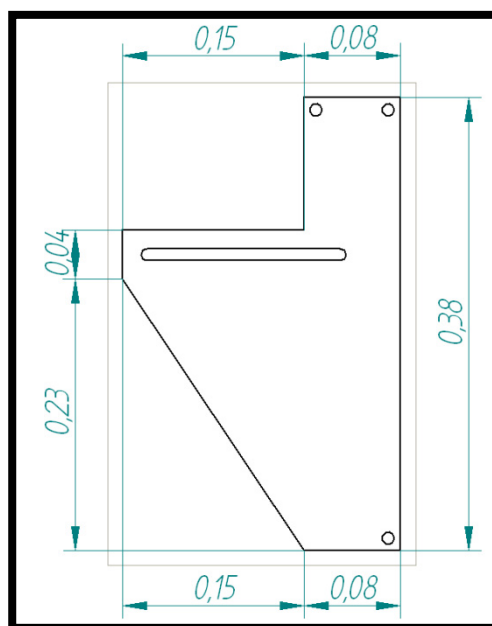
Para diseñar la Cadera, lo primero que se debe pulsar es al botón “*Polygon*” que crea un polígono irregular:



**Figura 3.10: Botón “*Polygon*” que diseña un polígono irregular en WM 2D.**

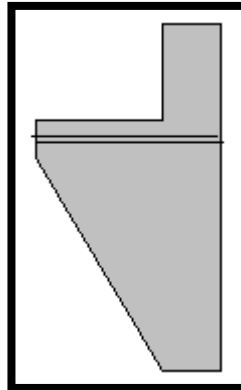
Una vez pulsado el botón se van seleccionando los puntos para indicar los vértices de la Cadera, creando rectas unidas entre los puntos seleccionados.

En la figura 3.11 se detalla el plano de la Cadera que se ha creado en WM para disponer de las dimensiones necesarias.



**Figura 3.11: Plano de la Cadera.**

El resultado del diseño de la Cadera es el siguiente:



**Figura 3.12: Diseño de la Cadera del robot Pasibot utilizada en Working Model 2D.**

### 3) Motor.

El Motor es el elemento utilizado en el robot Pasibot para que pueda tener movimiento y así camine. Las características que se le proporciona al Motor puede ser modificada por:

- Velocidad [ $^{\circ}/s$ ].
- Par [N-m].
- Rotación [ $^{\circ}$ ].
- Aceleración [ $^{\circ}/s^2$ ].

El diseño del Motor es muy fácil con Working Model 2D, solo se debe pulsar el botón “Motor”:

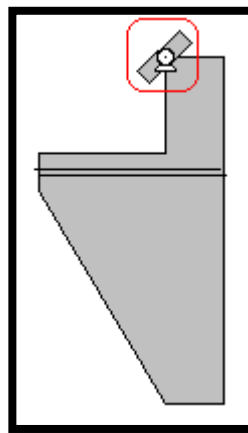


**Figura 3.13: Botón “Motor” que proporciona un Motor en WM 2D.**



Una vez que se ha pulsado el botón se debe pulsar la ubicación donde se quiere posicionar el Motor. En este caso se quiere que el Motor mueva la manivela, la manivela a su vez hace mover las bielas de las dos piernas y éstas hacen a su vez el movimiento de las piernas del robot Pasibot para que pueda moverse y caminar.

A continuación (figura 3.14) se muestra una imagen de la posición del Motor en la Cadera del robot Pasibot para que pueda mover la manivela:

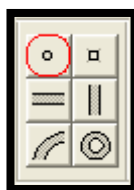


**Figura 3.14: Colocación del Motor en la Cadera del robot Pasibot.**

#### 4) Uniones.

Todos los diseños que se han realizado anteriormente se deben unir para formar el robot Pasibot. Las uniones que se proporcionan permiten la rotación de sus elementos.

Para unirlos, lo primero que se tiene que hacer es colocar en cada eslabón y en la Cadera el punto que permita la rotación. Para ello se debe seleccionar un botón denominado “*Point element*”, se muestra en la figura 3.15:



**Figura 3.15:** Botón “*Point element*” que crea el punto de unión entre dos piezas.

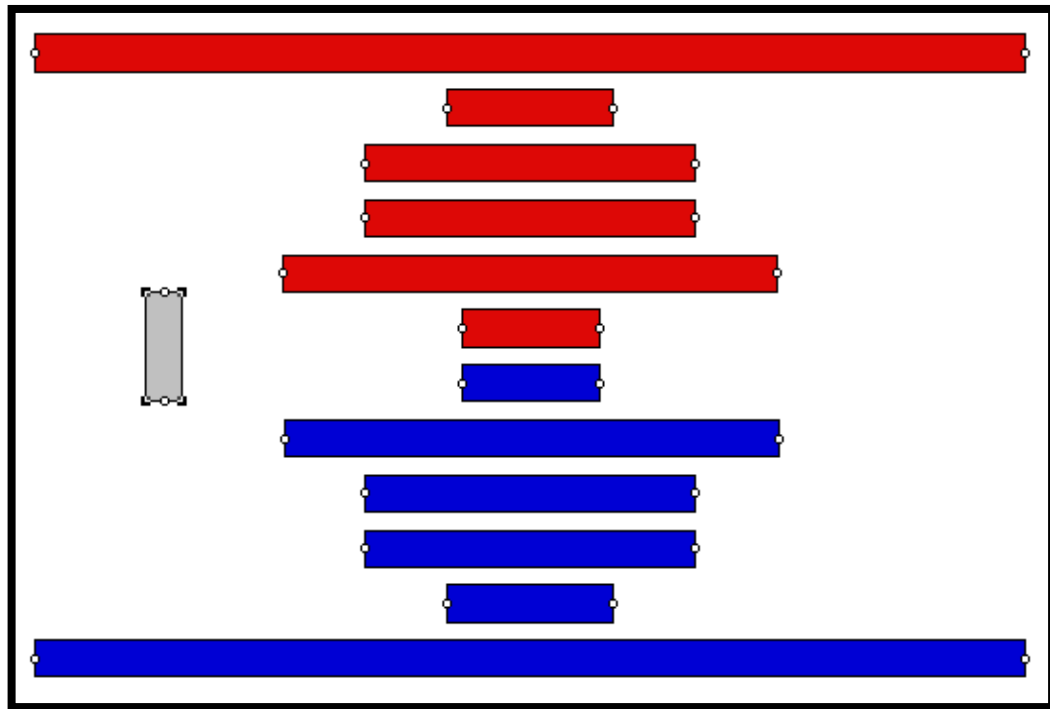
Una vez pulsado este botón, se debe indicar el punto de la pieza donde se quiere permitir esa unión. En casi todos los eslabones creados, el punto donde se ha permitido esa unión es en la mitad de la pared lateral de cada eslabón. Para saber cuál es la mitad exacta, cuando se aproxima con el botón ya pulsado al lateral de la pieza que se quiere unir, aparece una cruz en la mitad exacta, aproximándose a ese punto se pulsa el botón izquierdo del ratón y se queda establecido en dicho lugar ese punto la unión.



**Figura 3.16:** Forma de localizar uniones en las piezas del robot Pasibot.

En la parte izquierda de la figura 3.16 aparece la cruz donde se puede colocar la unión. La unión se creará en el centro de dicha cruz. En la parte derecha de la imagen 3.16 aparece como queda la unión en el eslabón.

La forma de creación de las uniones tal como se han explicado anteriormente, se hacen en 13 de los 23 eslabones creados, estos eslabones son: Peroné, Tendón Inferior, Tendón Superior, Rodilla, Contrafémur, Balancín y Manivela. Cada uno de su respectiva pierna excepto la Manivela que sólo existe una.



**Figura 3.17: Uniones simples de los eslabones del robot Pasibot.**

El resto de las uniones se hacen de la misma manera excepto que se deben realizar unas uniones dentro del eslabón. La forma de saber la localización exacta de esos puntos es usando las coordenadas de esos puntos, o bien como por ejemplo para la rodilla, se sitúa en un sitio y se va construyendo a partir de ella de forma que el Contrafémur y el Fémur estén en paralelos en todo instante, así se localiza la unión del estabilizador. También la unión del pie se puede crear de la misma manera colocando el Peroné y la Tibia en paralelo en todo instante.

De esta manera se crean las uniones dentro de los eslabones del resto de las piezas que son las siguientes: Biela, Estabilizador, Fémur, Tibia, Pie. Cada uno de su respectiva pierna.

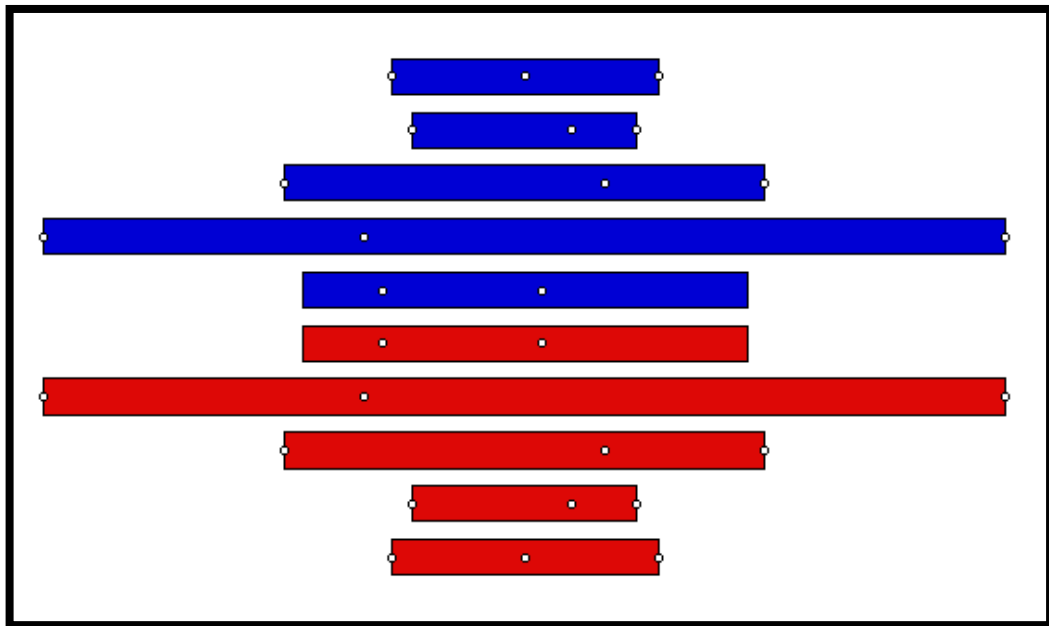


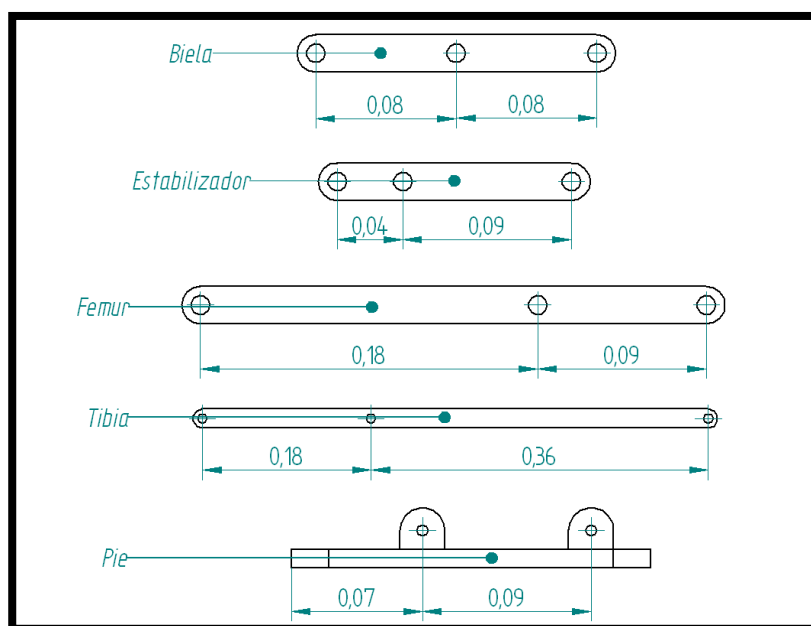
Figura 3.18: Uniones intermedias de los eslabones del robot Pasibot.

Existe otro botón en Working Model 2D que ahorra este paso, que consiste en posicionar una barra encima de otra y pulsando el botón (figura 3.19), se pincha en el punto que este una barra encima de otra y realiza la unión directamente, en este caso permitiendo la rotación. El botón es el siguiente “*Pin joint*”:



Figura 3.19: Botón “*Pin joint*” que realiza la unión directa de dos eslabones en WM 2D.

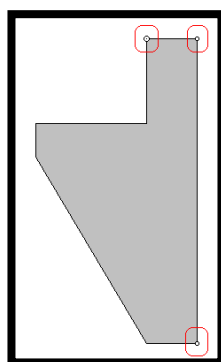
En la figura 3.20 se representan las dimensiones necesarias, de los eslabones de robot Pasibot, para el posicionamiento de las uniones en el interior de los eslabones.



**Figura 3.20: Dimensiones de los eslabones del robot Pasibot con uniones intermedias.**

Por último queda por realizar las uniones de la Cadera, sólo se debe pulsar el botón indicado en la figura 3.15 y pinchar en los vértices de la Cadera donde quieran posicionarse las uniones. Se realiza de la misma forma que se ha explicado anteriormente (principio del apartado de uniones), porque cuando se aproxima al vértice donde se quiere colocar aparece una cruz. Estando la cruz indicada se pulsa el botón izquierdo del ratón y posiciona la unión en el centro de dicha cruz.

Los puntos de la Cadera en los que se ha colocado una unión se indican en la figura 3.21:



**Figura 3.21: Uniones de la Cadera del robot Pasibot.**

Además, en la Cadera del robot Pasibot se debe realizar una guía, que es donde irá unido un punto de unión del Estabilizador de cada pierna, que permite que ese punto se desplace por la guía sin salirse de ella.

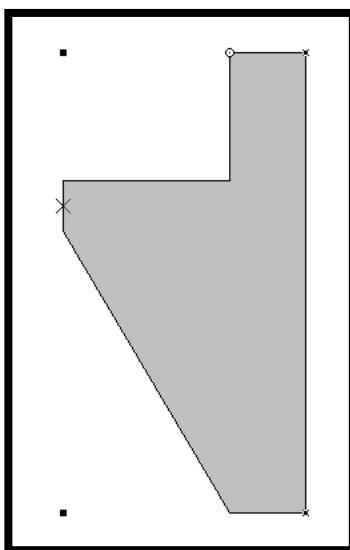
Para crear una guía lo primero que se debe hacer es dar al botón “*Slot element*” de Working Model que crea la guía, se indica en la figura siguiente:



**Figura 3.22:** Botón “*Slot element*” que crea una guía horizontal en Working Model 2D.

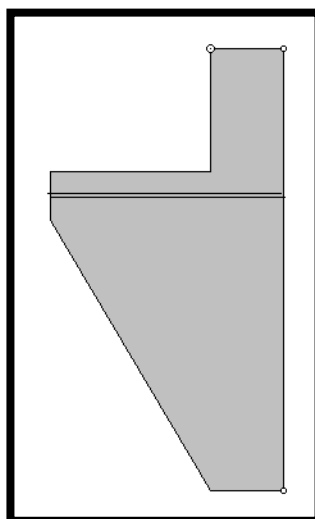
En este caso la guía que se va a crear es horizontal, como se ve más adelante en su colocación.

Una vez que se ha pulsado el botón en la figura 3.22, lo siguiente es indicar su posición en la Cadera del robot Pasibot. Lo único que se debe hacer es aproximarse en este caso a la mitad de una recta (recta perpendicular a la guía) de la Cadera que sea el extremo de la guía y aparece la cruz, en la siguiente imagen se aclara lo explicado.



**Figura 3.23:** Creación de la guía en la Cadera del robot Pasibot.

Pulsado el botón de la figura 3.22 y acercándose a la mitad de la recta (como se ha explicado anteriormente) se observa la cruz indicada, una vez aparecida la cruz, se pulsa el botón izquierdo del ratón y coloca la guía horizontal con extremo en el centro de la cruz indicada. El resultado es la siguiente imagen:



**Figura 3.24: Guía creada en la Cadera del robot Pasibot.**

Comentar que para cada guía creada solo se permite una unión y como se tienen que unir dos Estabilizadores (uno por cada pierna) a la guía, se tendrán que crear dos guías.

### 5) Conexiones.

El último paso que se debe realizar para la construcción del robot Pasibot es conectar las uniones que se han realizado en el apartado anterior. El modo de realizar las conexiones con Working Model 2D es muy sencillo y consta de 3 pasos:

I. Pulsar con el botón izquierdo de ratón sobre el punto de unión de la pieza que se quiere unir (cuando este seleccionado, el punto de unión se quedara relleno de color negro).

II. Se pulsa la tecla *SHIFT* del teclado y manteniéndola pulsada se hace clic con el botón izquierdo del ratón sobre otro punto de unión de otra pieza que se quiera unir (cuando este seleccionado, el punto de unión se quedara relleno de color negro a la vez que el punto anterior).

III. Finalmente se pulsa un botón “*Join*” del programa Working Model 2D que permite la unión de dos puntos seleccionados previamente. La figura 3.25 indican la función de unir los dos puntos seleccionados.



**Figura 3.25: Botón “*Join*” que permite unir dos puntos de unión previamente seleccionados.**

Se debe aclarar que si, en el cuadro anterior, ninguna de las dos opciones puede ser seleccionada, indica que no se han señalado los dos puntos de unión previamente, el botón quedaría como en la figura 3.26:



**Figura 3.26: Imagen que indica que no se puede realizar una unión porque no se ha seleccionado los dos puntos de unión previamente.**



De igual forma que existe la opción de unir dos piezas, se pueden separar haciendo clic con el botón izquierdo del ratón en el punto de unión de dos piezas y después se debe seleccionar la opción *"Split"*. Se muestra en la figura 3.27:

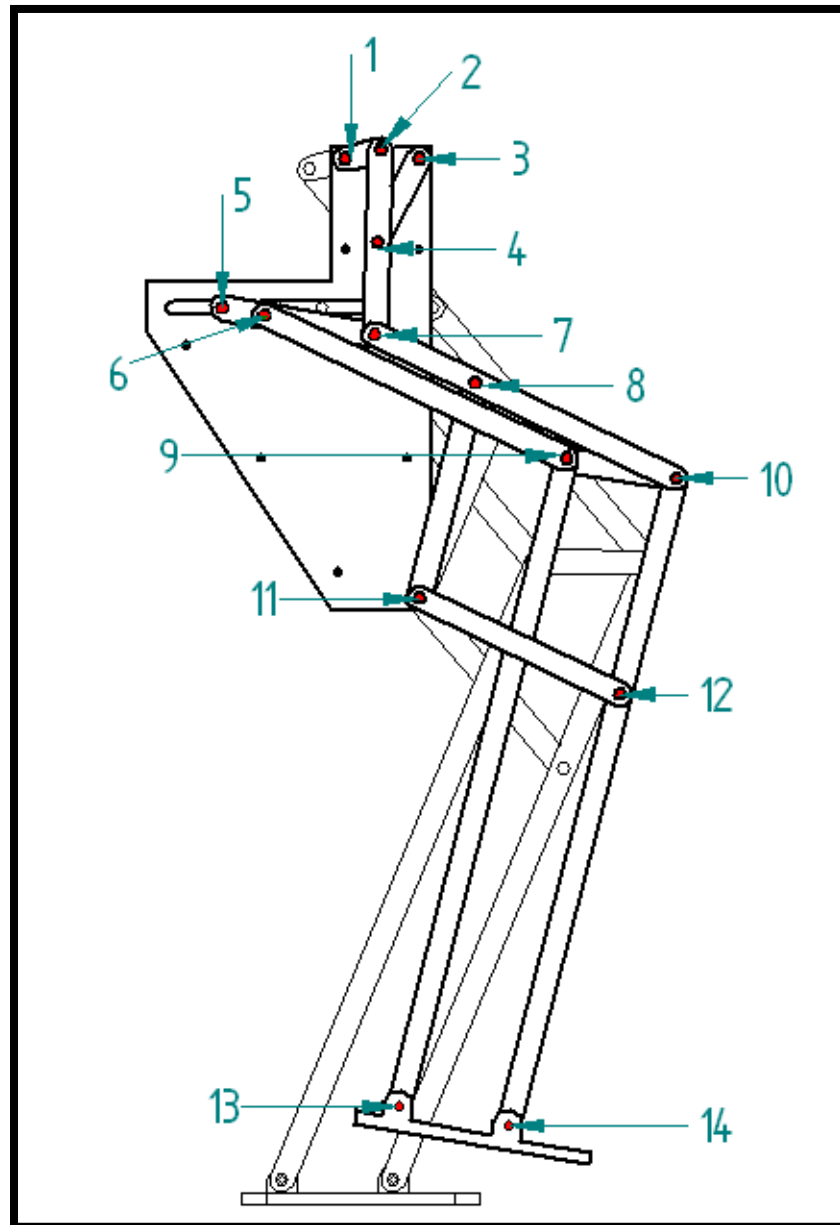


**Figura 3.27: Botón *"Split"* que permite separar dos puntos previamente unidos.**

Con los pasos descritos anteriormente, se dispone de toda la información para crear el robot Pasibot, lo único que se debe saber es las piezas del robot Pasibot que implica cada unión.

Para ello se ha realizado una captura de imagen (figura 3.28) en la que se representa una enumeración de cada uno de los puntos de unión.

En cada punto enumerado se unirán dos o tres piezas del robot Pasibot dependiendo del caso. La enumeración se ha realizado de izquierda a derecha y de arriba abajo.



**Figura 3.28: Puntos de unión del robot Pasibot.**

La figura 3.28 se ha realizado para entender mejor la tabla 3.2 donde se indican los puntos de unión del robot Pasibot y las partes del robot Pasibot que une cada punto en concreto.

A continuación se muestra la tabla 3.2, que señala los puntos de unión (identificados en la figura 3.28) y las piezas del robot Pasibot (figura 3.6).

En dicha tabla se relaciona cada punto de unión con las piezas que se unen en dicho punto.

Tabla 3.2: Puntos de unión de las piezas del robot Pasibot.

Pieza	Localización	Unión	
<b>Manivela</b>	1	Motor	
	2	Biela	
<b>Biela</b>	2	Manivela	
	4	Balancín	
	7	Estabilizador	Fémur
<b>Balancín</b>	3	Cadera	
	4	Biela	
<b>Estabilizador</b>	5	Deslizadera de la Cadera	
	6	Contrafémur	
	7	Biela	Fémur
<b>Contrafémur</b>	6	Estabilizador	
	9	Rodilla	Peroné
<b>Fémur</b>	7	Biela	Estabilizador
	8	Tendón Superior	
	10	Rodilla	Tibia
<b>Rodilla</b>	9	Contrafémur	Peroné
	10	Fémur	Tibia

Pieza	Localización	Unión	
<b>Tendón Superior</b>	8	Fémur	
	11	Cadera	Tendón Inferior
<b>Tendón Inferior</b>	11	Cadera	Tendón Superior
	12	Tibia	
<b>Cadera</b>	1	Motor	Manivela
	3	Balancín	
	5	Deslizadera de la Cadera	
	11	Tendón Superior	Tendón Inferior
<b>Peroné</b>	9	Contrafémur	Rodilla
	13	Pie	
<b>Tibia</b>	10	Fémur	Rodilla
	12	Tendón Inferior	
	14	Pie	
<b>Pie</b>	13	Peroné	
	14	Tibia	

Estas uniones representan sólo los de una pierna, ya que la otra pierna tiene los mismos puntos de unión y las mismas piezas se unen a dichos puntos.

### **3.3.- Obtención de los resultados del robot Pasibot con WM 2D.**

Los resultados que se van a obtener se pueden dividir en dos grupos. Por un lado la obtención de la posición, velocidad y aceleración (cinemática) que se presentarán en el capítulo 4, y por otro lado la obtención de las reacciones (dinámica), presentados en el capítulo 5. Estos estudios se realizarán para cada una de las partes del robot Pasibot que más sean de interés.

En primer lugar se ha obtenido la posición, velocidad y aceleración de las siguientes partes.

- Talón. En la figura 3.28 está representado como punto de unión número 13. Es el punto de unión que une el Pie con el Peroné (tanto de la pierna derecha como la izquierda).
- Rodilla Trasera. En la figura 3.28 se ha identificado como el punto de unión 9. Es el punto de unión que une el Contrafémur con la Rodilla y con el Peroné (derecha e izquierda).
- Rodilla Delantera. En la figura 3.28 identificado como el punto de unión número 10. Es el punto que une el Fémur con la Rodilla y con la Tibia (derecha e izquierda).
- Centro de Gravedad de la Cadera, que lo obtiene directamente el programa. En el menú desplegable de “*Measure*” existe la opción de medir la posición, la velocidad y la aceleración del CDG (se puede observar en la figura 3.34).

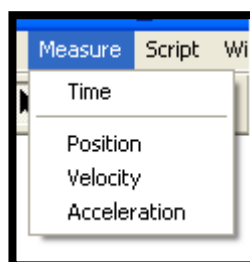
Para su obtención lo único que se debe hacer es señalar pulsando el botón izquierdo del ratón sobre el punto de unión de cualquiera de las partes que se acaban de enumerar.

Después se va a la opción “*Measure*” que está localizada en el menú superior tal y como se puede observar en la figura 3.29:



**Figura 3.29: Opción "Measure" de Working Model 2D.**

Una vez que se ha pinchado en esa opción se despliega un menú con las opciones de tiempo, posición, velocidad y aceleración. Obteniéndose la magnitud que se ha seleccionado en el menú, del punto que se ha señalado previamente. El tiempo que se realiza esa medición se puede determinar previamente.



**Figura 3.30: Opciones desplegables en el menu de *Measure*.**

Lo único que se debe hacer es seleccionar la opción que se necesite y aparecerá una ventana donde se observaran los valores según avance la simulación.

El tiempo de estudio de cada magnitud se puede determinar de dos formas:

1. Pausando la simulación en el instante que el usuario pulse el botón “*Stop*” que se muestra en la figura 3.31:



**Figura 3.31: Botón *Stop* que detiene la simulación.**

Además de detener la simulación con el botón “*Stop*”, Existe la opción de parar la simulación y volver a la posición del inicio de la simulación, denominado con la palabra “*Reset*”.

2. Indicar mediante una opción del menú desplegable “*World*”, la opción “*Pause Control*” tal y como se señala en la figura 3.32 apareciendo la ventana que aparece en la figura 3.33.



Figura 3.32: Botón "Pause Control".

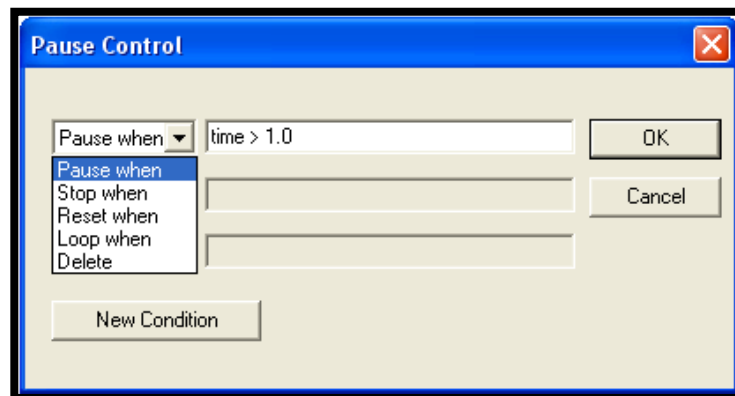


Figura 3.33: Opciones de "Pause Control".

Seleccionando el botón "New Condition" y pinchando en la flecha, se despliega un menú con cada una de las condiciones que se le pueden dar al tiempo. Seleccionando es este caso "Stop when" para un tiempo que se identificara como el tiempo en el que el robot Pasibot realiza su movimiento.

El estudio de la dinámica del robot Pasibot se realiza mediante obtención de las reacciones de las piezas del robot Pasibot que más interesen. En este caso las piezas que se estudian, además del Motor que mueve el robot Pasibot, son:

- Pie. Pieza que entra en contacto con el suelo y está representada en la figura 3.6 (tanto de la pierna derecha como de la pierna izquierda).
- Rodilla. Eslabón de unión que une el Contrafémur y el Peroné con el Fémur y la Tibia representada en la figura 3.6 (derecha e izquierda).
- Cadera.

Lo único que se debe hacer es seleccionar el eslabón que se quiera estudiar. Luego seleccionar la opción “*Measure*” tal y como se ha dicho en la figura 3.29. El menú que se despliega en este caso es el siguiente:

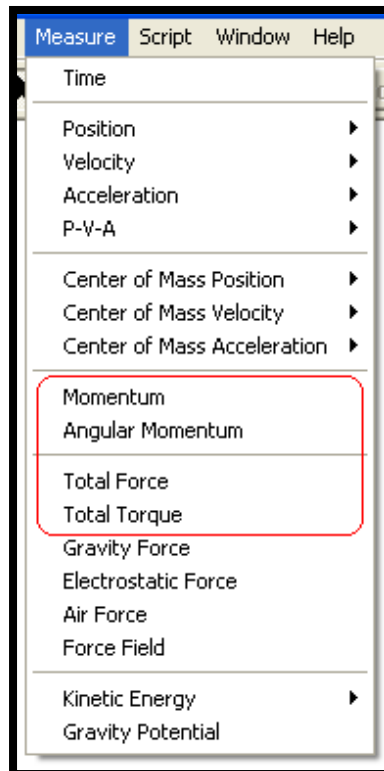


Figura 3.34: Menú desplegable de las reacciones de un eslabón.



## “Análisis Cinemático y Dinámico del Robot Pasibot”

En este caso se ha señalado las opciones (estudio dinámico) que se obtendrán para su estudio y posterior análisis.

Cuando se pincha en cada una de las opciones aparece una ventana con los datos que se mostrarán según avancen la simulación.

Para concluir la obtención de resultados, una vez que se ha diseñado el robot Pasibot, colocado el Motor y sacado las ventanas de estudio de los datos de interés. Se construye un suelo sobre el que avanzara el robot Pasibot y lo único que se debe hacer es iniciar la simulación, con el botón identificado en la figura 3.35.



Figura 3.35: Botón “Run” que inicia de la simulación.

Con esto se inicia la simulación. Se puede detener la simulación con una de las dos opciones explicadas anteriormente (figuras 3.31, 3.32 y 3.33). Para su análisis, los datos se han exportado a Microsoft Excel para la obtención de gráficos para poder realizar un análisis más sencillo.

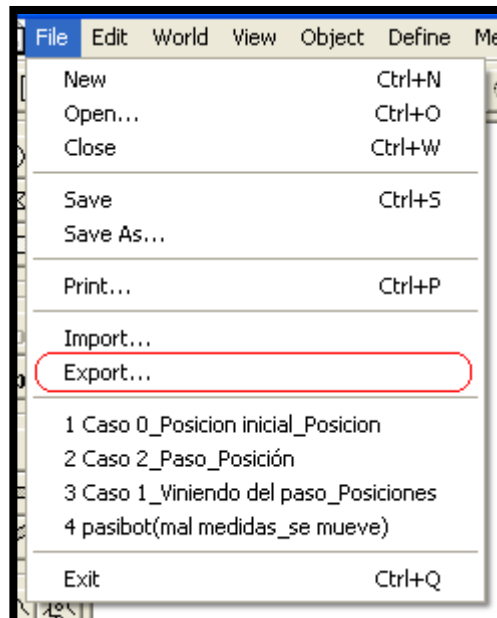


Figura 3.36: Opción de exportar los resultados con Working Model 2D.

Con esto ya se dispone de todo lo necesario para obtener los resultados necesarios y su posterior análisis.

Por último señalar una opción que se utilizara más adelante. Esta opción permite anclar cualquier pieza para que no realice ningún movimiento (como es el caso de la pieza que representa el suelo sobre el que camina el robot Pasibot), aunque sufra fuerzas que intenten darle movimiento a esa pieza. Esta opción denominada “*Anchor*”, está representada en la figura 3.37.



**Figura 3.37: Botón “Anchor”.**

---

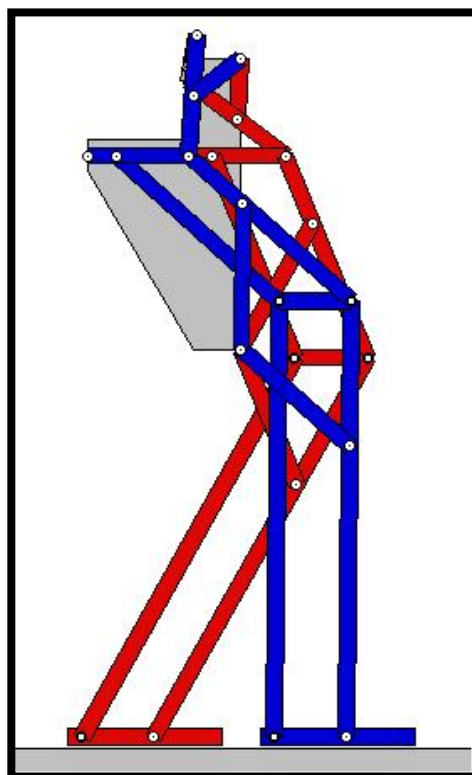
# Capítulo 4

**Análisis cinemático del robot Pasibot**

## **4.1.- Análisis cinemático del robot Pasibot** **con Working Model 2D.**

En este apartado se realizará un análisis cinemático del robot Pasibot que se han obtenido con el programa presentado anteriormente: Working Model 2D.

Para ello se ha diseñado el robot Pasibot, siguiendo los pasos y las dimensiones proporcionadas en el apartado anterior. En la figura 4.1 se puede observar cómo queda diseñado por completo el robot Pasibot:



**Figura 4.1: Pasibot diseñado con Working Model 2D.**

En la figura 4.1 se ha representado en color azul la pierna derecha y en color rojo la pierna izquierda, los elementos comunes del robot se representan en color gris.

Mediante la utilización del programa WM 2D, al robot se le ha proporcionado un Motor en el punto que une la Cadera con la Manivela (la posición del Motor se describe en el apartado anterior). El Motor le permite al robot tener el movimiento de caminar. Además, se ha diseñado (como se puede observar en la parte inferior de la figura 4.1 en gris) un rectángulo de condiciones estándares que representa la superficie por la que camina el robot Pasibot (se asemeja a una superficie de suelo).

A la hora de darle movimiento al robot Pasibot se han encontrado numerosos problemas. El principal problema se produce a la hora de iniciar la simulación, por motivo de que se trata de una simulación compleja, el programa se bloquea y no permite continuar la simulación.

A continuación (figura 4.2) se representa el movimiento del robot Pasibot mediante una serie de capturas de imágenes obtenidas de un video del movimiento, para poder visualizar su movimiento de manera más clara.

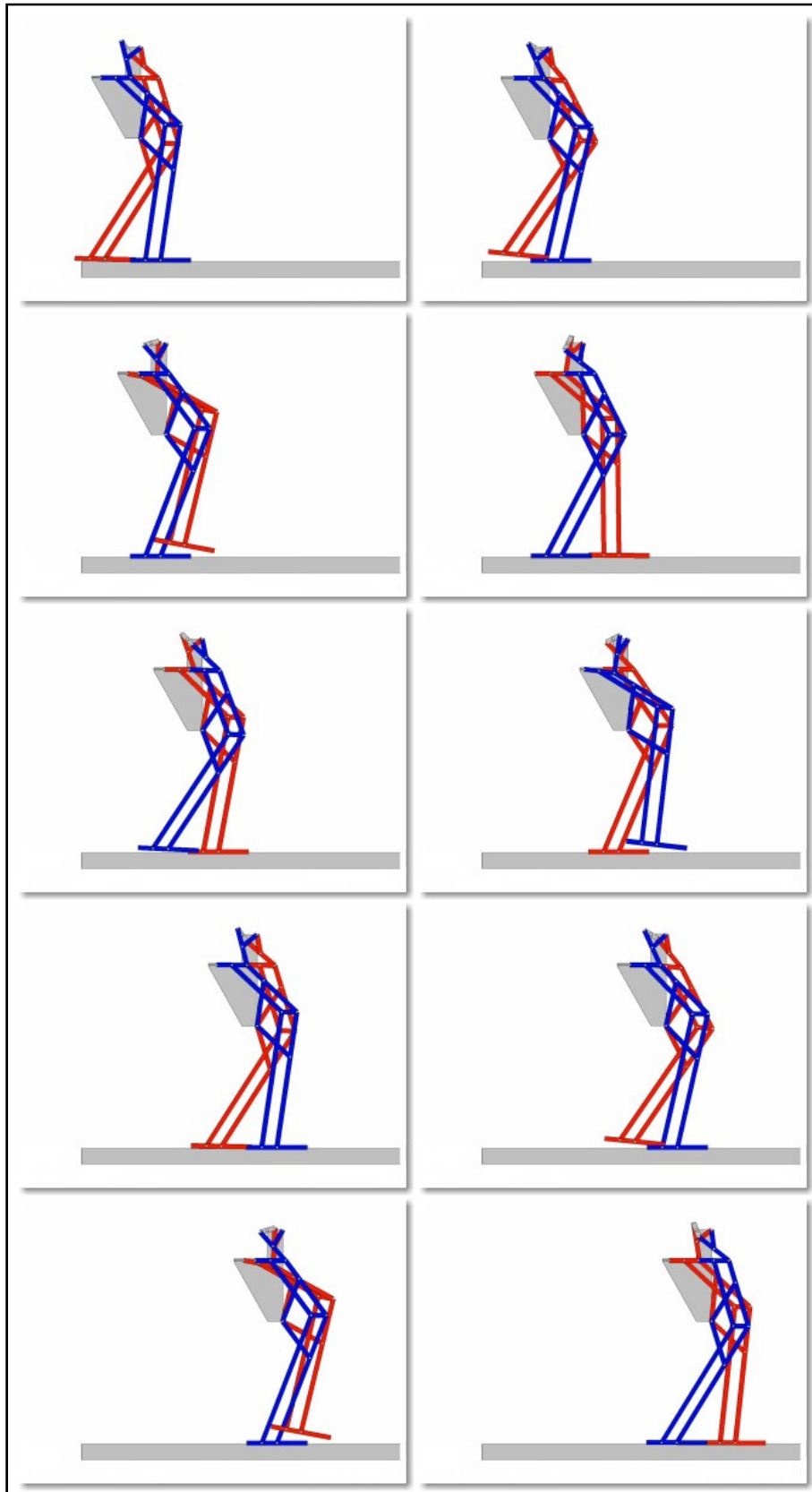


Figura 4.2: Movimiento del robot Pasibot.

Mediante las imágenes vistas en la figura 4.2 se puede interpretar cómo se realiza el movimiento del robot Pasibot.

Para la comprensión de los resultados que más adelante se podrán observar se deben especificar las características técnicas de las piezas que componen el robot Pasibot y el suelo, expresados en la tabla 4.1:

**Tabla 4.1: Características técnicas de las piezas del Robot Pasibot.**

Pieza	Material	Masa [kg]	Fricc. Static.	Fricc. cinet.	Coef. Elastic.	Charge	Densidad [kg/m <sup>2</sup> ]	Momento [kg . m <sup>2</sup> ]
Suelo	Custom	80	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	673,333
Pie	Custom	0,059	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	15,286	$1,823 \cdot 10^{-4}$
Tibia	Custom	0,144	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	0,004
Peroné	Custom	0,144	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	0,004
Rodilla	Custom	0,016	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	8,889	$1,133 \cdot 10^{-5}$
Fémur	Custom	0,072	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$4,398 \cdot 10^{-4}$
Contrafémur	Custom	0,072	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$4,398 \cdot 10^{-4}$
T. Inferior	Custom	0,048	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$1,312 \cdot 10^{-4}$
T. Superior	Custom	0,048	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$1,312 \cdot 10^{-4}$
Estabilizador	Custom	0,032	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	12,800	$4,273 \cdot 10^{-5}$
Biela	Custom	0,040	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$7,633 \cdot 10^{-5}$
Balancín	Custom	0,020	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$1,004 \cdot 10^{-5}$
Manivela	Custom	0,016	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	13,333	$5,333 \cdot 10^{-6}$
Cadera	Custom	1,095	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	26,642	0,011

Estas características las proporciona directamente el programa Working Model 2D según las dimensiones que tenga la pieza en cuestión.

Las características se pueden modificar y poner diferentes materiales, como acero, goma,... Se ha decidido no modificar ninguna de estas características y utilizar las proporcionadas por el programa WM 2D.

Para realizar el estudio cinemático, se han estudiado una serie de puntos en concreto del robot Pasibot. Éstos son los puntos más interesantes de estudio con Working Model 2D respecto al futuro modelo real del robot Pasibot.

Los puntos de estudio sobre los que se han realizado el estudio cinemático son los siguientes:

- Talón I: Unión articulada que une el Pie Izquierdo con el Peroné I de la pierna izquierda.
- Talón D: Unión articulada que une el Pie Derecho con el Peroné D de la pierna derecha.
- Rodilla Trasera I: Unión articulada que une el Peroné, el Contrafémur y el eslabón denominado Rodilla I (que se usa para unir las articulaciones de la Rodilla Trasera I y la Rodilla Delantera I), perteneciente a la pierna izquierda.
- Rodilla Trasera D: Unión articulada que une el Peroné, el Contrafémur y el eslabón denominado Rodilla D (que se usa para unir las articulaciones de la Rodilla Trasera D y la Rodilla Delantera D) perteneciente a la pierna derecha.
- Rodilla Delantera I: Unión articulada que une la Tibia, el Fémur y el eslabón que se denomina Rodilla I, todo perteneciente a la pierna izquierda.
- Rodilla Delantera D: Unión articulada que une la Tibia, el Fémur y el eslabón que se denomina Rodilla D, todo perteneciente a la pierna derecha.



- CDG de la Cadera: Es el punto perteneciente al Centro de Gravedad de la pieza que representa la Cadera. WM detecta directamente el CDG de la Cadera y hace los cálculos sobre dicho punto.

En el transcurso de la simulación del movimiento del robot Pasibot, se han obtenido en función del tiempo los valores de: la posición, la velocidad y la aceleración; de dichos puntos con WM 2D. Con los datos obtenidos se han realizado gráficas con Microsoft Excel para tener una visión más sencilla. El intervalo de estudio depende del movimiento del robot Pasibot, pero el periodo de estudio ha sido por norma general de 10 segundos. En las gráficas, los límites de tiempo se ajustaran en función de los resultados, observando la variación que más interesa en cada caso.

En algunos casos de estudio que se verán más adelante, la posición inicial del robot se encuentra a una mínima altura del suelo para evitar problemas en las condiciones iniciales necesarias para la simulación de WM. El estudio de la caída hasta que entra en contacto con el suelo se omitirá debido a que el modelo real del robot Pasibot estará desde el instante inicial en contacto con el suelo.

El Motor merece un comentario aparte porque se ajusta su velocidad angular en función del resultado que se quiera obtener.

En los dos primeros casos, la velocidad del Motor es de cero radianes por segundo, es decir, la función del Motor es nula, aún así se han obtenido los resultados para su comprobación. En el tercer y cuarto caso el Motor si tiene una velocidad, que en el programa se expresa en grados por segundos, que permite al robot Pasibot avanzar dando pasos.

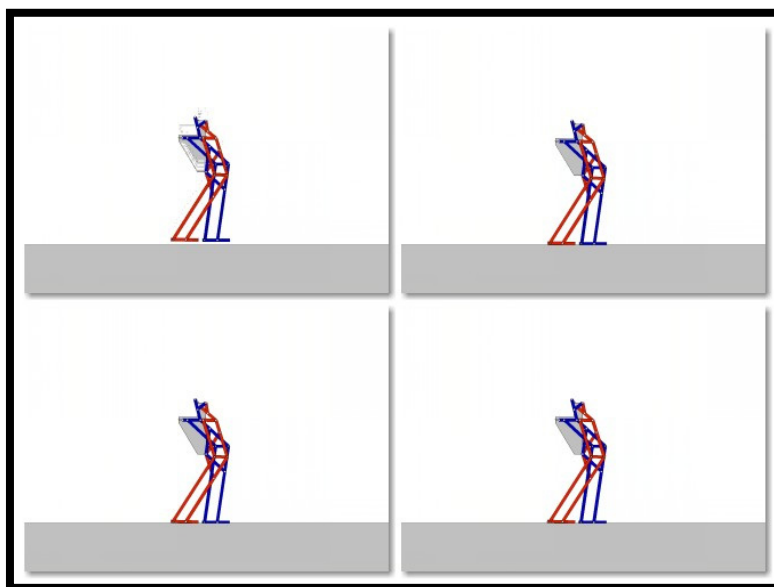
Se debe destacar que el origen del sistema de referencia sobre el que se realiza el estudio está localizado lo más próximo posible al talón de la pierna izquierda.

Para el análisis cinemático del robot Pasibot, el estudio se ha dividido en cuatro casos diferentes. A partir de ahora se comenta cada caso con los resultados obtenidos.

## 1º. **Caso 1: Robot Pasibot parado con los dos pies a la misma altura.**

En este caso se debe destacar que la velocidad del Motor es nula. Tanto el pie derecho como el pie izquierdo están a la misma altura. Además, inicialmente es difícil ajustar el robot en contacto con el suelo, por lo que se ha establecido una posición inicial de simulación en la que los pies están a una altura aproximada de 0,1 metros (probándose distancias menores con resultados semejantes). El tiempo de caída del robot al suelo se omitirá del estudio, por eso el instante inicial del estudio cinemático de este caso es cuando han transcurrido 0,5 segundos.

El único movimiento que hace el robot Pasibot al iniciar la simulación es caer por el efecto de la gravedad hasta ponerse en contacto con el suelo, y luego equilibrarse hasta quedarse en reposo. Este leve movimiento se muestra en la figura 4.3:



**Figura 4.3: Movimiento del robot Pasibot en el caso 1.**

A continuación se dispone a comentar los resultados obtenidos mediante la exportación de los datos obtenidos de WM 2D al programa Microsoft Excel para la representación en gráficos y así tener una visualización más sencilla para su análisis. En las siguientes figuras se muestran los resultados del caso 1.

- Posición

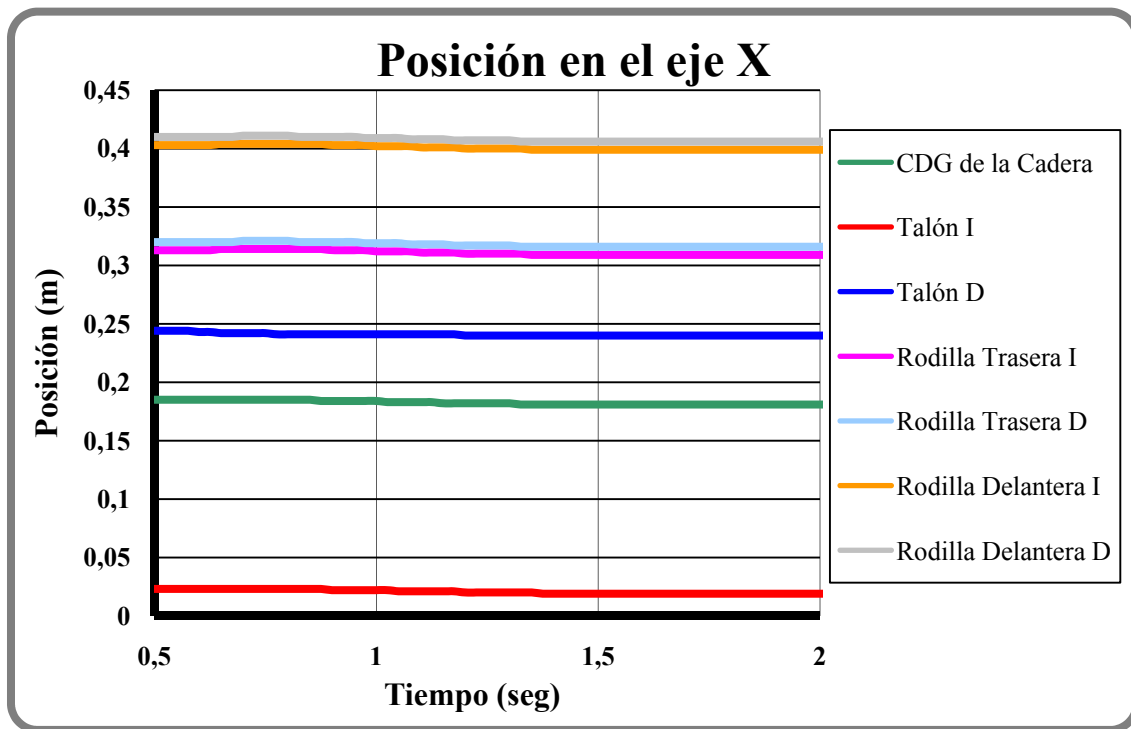


Figura 4.4: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 1).

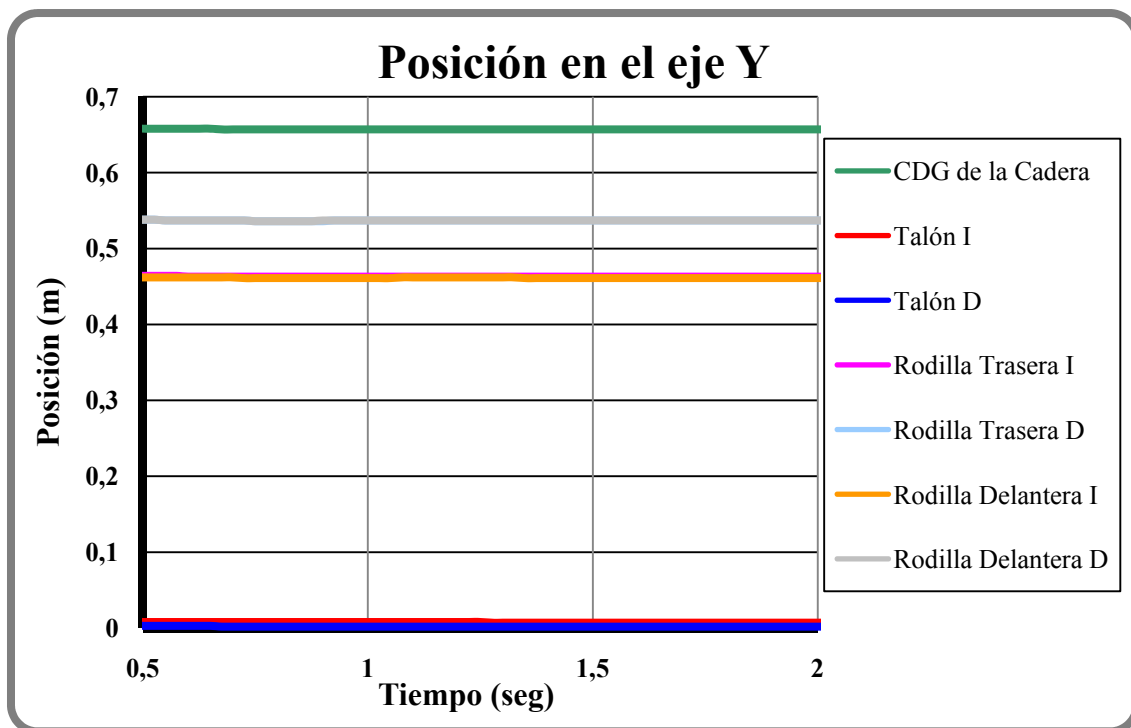


Figura 4.5: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 1).

Las figuras 4.4 y 4.5 representan la posición de los puntos del robot Pasibot que se están estudiando a lo largo de la simulación.

El instante inicial del tiempo de estudio de la posición se ha ajustado al momento en el que el robot Pasibot entra en contacto con el suelo. El instante final se ha establecido para un tiempo en el cual la posición ya no varía.

Desde el inicio de la simulación hasta que han transcurrido 0,5 segundos el robot Pasibot cae desde una altura de 0,1 metros por efecto de la fuerza gravitatoria con un valor proporcionado por WM 2D ( $g = 9,807 \text{ m/s}^2$ ). Cuando el robot Pasibot entra en contacto con el suelo se produce una reacción percusiva, de un valor que depende de las características tanto del suelo como de los pies del robot Pasibot que entran en contacto con el suelo. Por ello al entrar en contacto con el suelo el robot Pasibot asciende ligeramente para luego volver a bajar, produciéndose una oscilación con valor decreciente hasta que el valor de la reacción percusiva tiene un valor prácticamente nulo y el robot Pasibot ya no asciende. Este movimiento dura alrededor de 0,5 segundos y no se estudia ya que en el diseño real del robot Pasibot no se dejara caer desde ninguna altura, porque desde el instante inicial estará en contacto con el suelo.

El estudio de todos los resultados obtenidos en WM de este caso se realizarán a partir de 0,5 segundos que es cuando el robot Pasibot está en contacto con el suelo y no rebota.

Por lo demás se puede observar que la variación de la posición tanto en el eje horizontal como en el eje vertical es prácticamente nula en todos los puntos que se están estudiando del robot Pasibot.

En la figura 4.4 (posición en el eje X) se observa un ligero descenso de los valores que es constante en todos los puntos de estudio del robot Pasibot que se están estudiando y que tiene un valor de 0,004 metros. Además destaca, aunque no se pueda ver con claridad, un ligero incremento de la posición en el periodo de tiempo que va desde 0,7 hasta 0,8 segundos de la Rodilla Trasera D y la Rodilla Delantera D de un valor de 0,001 metros.

En la figura 4.5 (posición en el eje Y) se observa también un descenso en la posición que tiene un valor de 0,001 metros para todos los puntos del robot Pasibot que se están estudiando. Además también se da un ligero incremento de la posición de 0,001 metros en el intervalo de tiempo de 0,7 y 0,9 segundos en las rodillas de la pierna izquierda del robot Pasibot

Estos incrementos y decrementos se deben a un ligero movimiento que tiene el robot Pasibot que es inapreciable a simple vista y que se debe al equilibrio del robot Pasibot sobre el suelo.

Con estas figuras se puede hacer una idea de la situación de los puntos que se están estudiando del robot Pasibot, como por ejemplo se observa que los talones se encuentran muy cercanos al eje horizontal y que el CDG de la Cadera es la más alta. También se puede observar en la figura 4.4 que la posición en el eje X de la Rodilla Delantera de ambas piernas es semejante, esto se puede comprobar en la figura 4.1.

- **Velocidad**

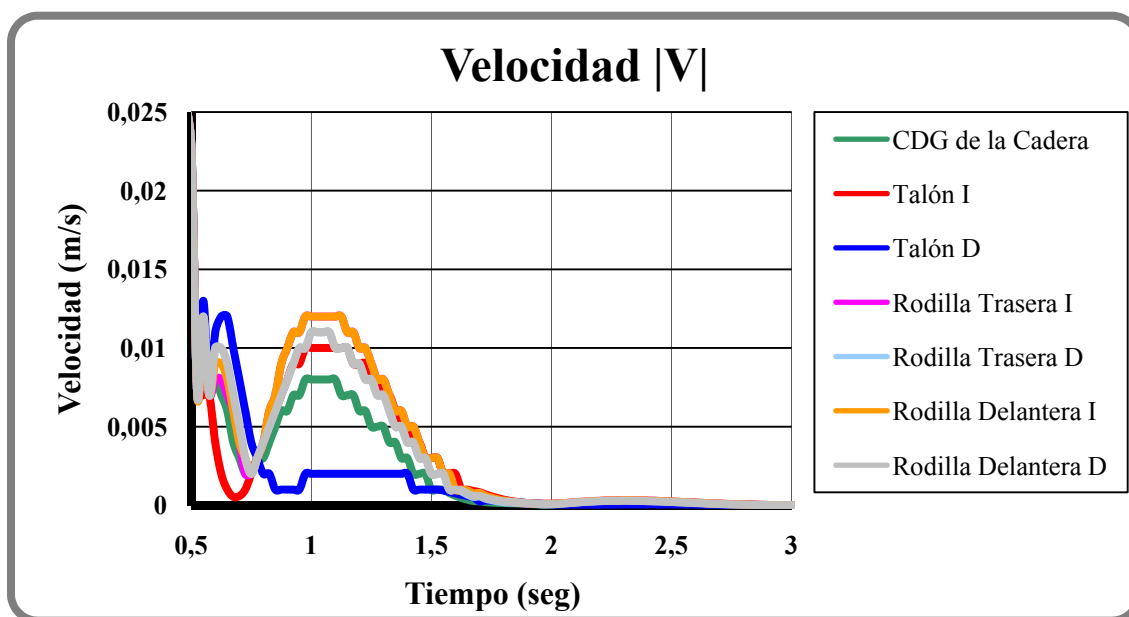


Figura 4.6: Evolución del módulo de la velocidad en función del tiempo (Caso 1).

En primer lugar se puede destacar que se podría reducir el límite superior de tiempo a dos segundos, pero así no se podría haber apreciado el ligero incremento que alcanza entre dos y tres segundos, alcanzando un máximo de 0,00029 m/s cuando han transcurrido aproximadamente 2,3 segundos.

Por otra parte, se puede observar que inicialmente ( $t=0,5$  segundos) el valor de la velocidad de todos los puntos de estudio tienen un valor de 0,23 segundos.

Transcurrido ese instante inicial se produce un descenso considerable del módulo de la velocidad. Tras ello, se produce una ligera oscilación en torno a un valor aproximado de 0,005 segundos, teniendo todos los puntos del robot Pasibot la misma tendencia excepto del Talón D que tiene una tendencia inversa.

Finalmente cuando han transcurrido 1,5 segundos la tendencia de todos los puntos de estudio del robot Pasibot tiende a cero, para luego producirse un ligero incremento explicado anteriormente.

La variación del módulo de la velocidad es debida al movimiento que realiza el robot Pasibot para equilibrarse sobre el suelo.

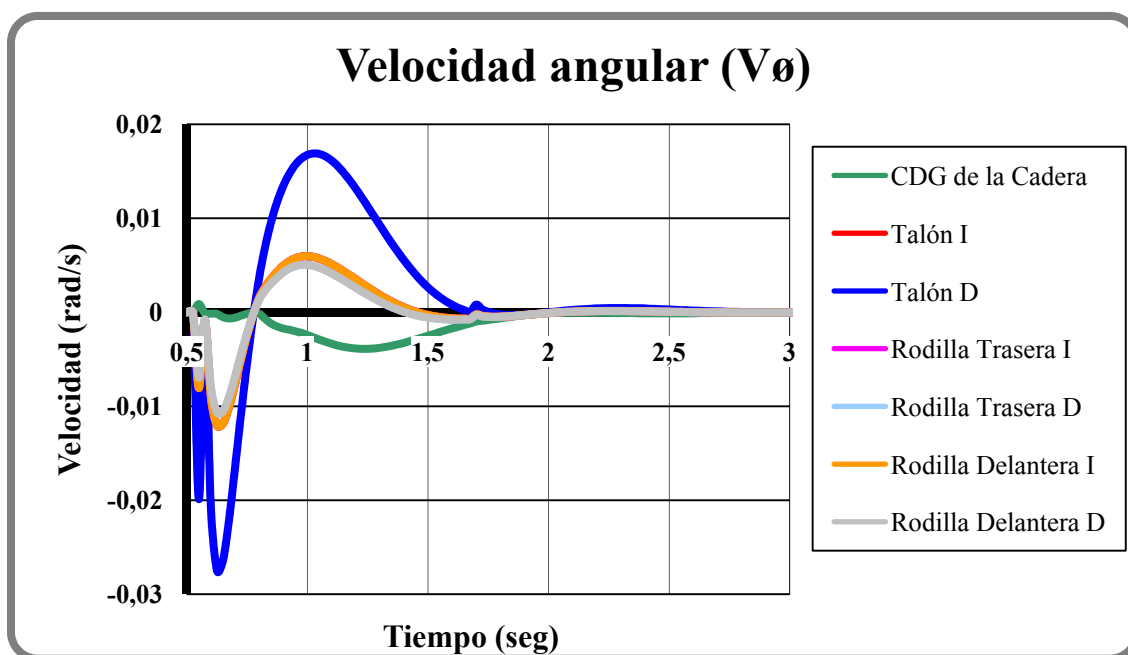


Figura 4.7: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 1).

En el instante de tiempo de 0,525 segundos la velocidad angular de todos los puntos varia siendo negativa en todos los casos excepto en el Centro de Gravedad de la Cadera que aunque varia ligeramente lo hace con valores positivo.

La máxima variación de velocidad angular corresponde al Talón D que baja hasta una velocidad de -0,01987911 rad/s en el instante de tiempo de 0,55 segundos, luego vuelve a aumentar hasta un valor de -0,001832578 rad/s para un valor del tiempo de 0,575 segundos y luego volver a bajar alcanzando un mínimo de -0,02747122 rad/s en el instante de 0,625 segundos. Finalmente se produce una oscilación respecto a una velocidad angular nula (de los talones y rodillas del robot). Esta variación de la velocidad angular corresponde a que inicialmente el robot entra en contacto con el suelo y después se dispone a equilibrarse respecto a su posición de equilibrio.

El resto de puntos de estudio hace la misma evolución de la velocidad angular pero con valores de menor magnitud. Excepto el CDG de la Cadera que sufre una evolución distinta debido a que la Cadera está sujeta por varios puntos y para equilibrarse lo hace de forma diferente.

Se debe comentar el reducido valor que tienen las velocidades angulares con valores que van desde 0,01685972 rad/s hasta un valor mínimo de -0,02747122 rad/s.

- **Aceleración**

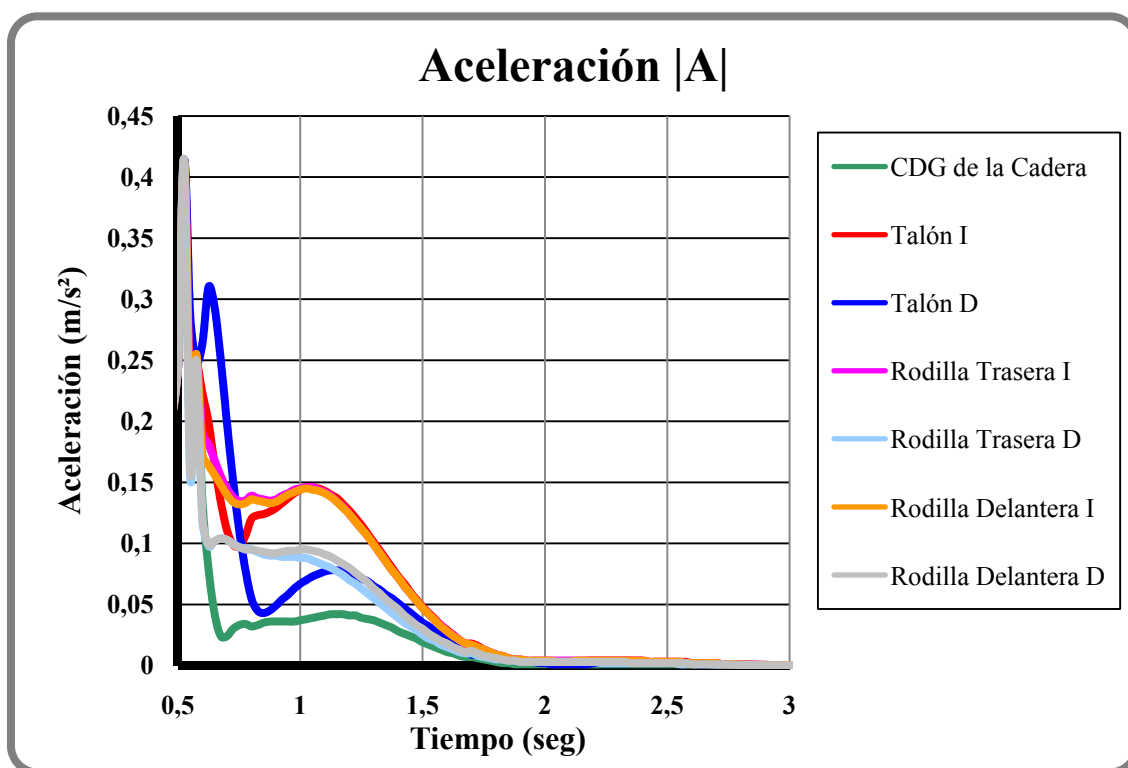


Figura 4.8: Evolución del módulo de la aceleración en función del tiempo (Caso 1).

La evolución inicial del módulo de la aceleración es semejante en todos los puntos que se están estudiando del robot Pasibot, por ello solo se puede apreciar la evolución de la Rodilla Delantera D. En el instante inicial el módulo de la aceleración tiene un valor de  $0,243 \text{ m/s}^2$  para alcanzar un instante después una aceleración de  $0,414 \text{ m/s}^2$ .

Después el módulo de la aceleración produce una ligera oscilación para tener una tendencia negativa y alcanzar valores próximos a cero cuando han transcurrido apenas 1,9 segundos.

Además, transcurridos 0,575 segundos, se puede observar la diferencia de las aceleraciones alcanzadas de los distintos puntos de estudio del robot Pasibot.

Finalmente se observa que transcurridos menos de dos segundos los valores del módulo de la aceleración tienden a cero indicando que el robot Pasibot no se mueve y está en su posición de equilibrio.



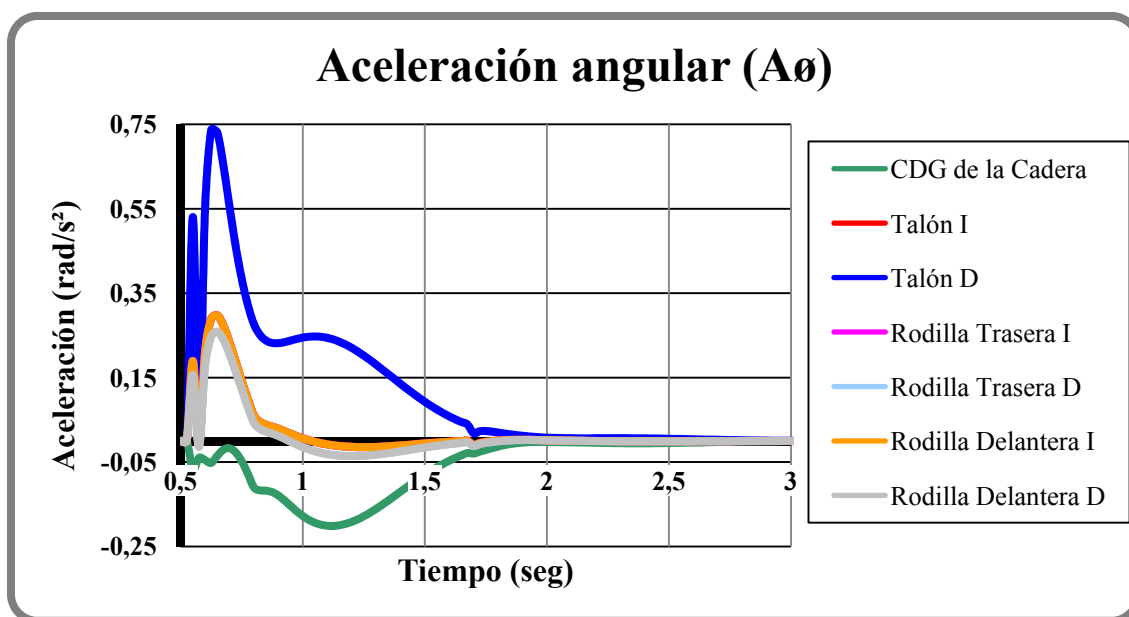


Figura 4.9: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 1).

Esta figura es consecuencia de la figura 4.7. Poco después del instante inicial (transcurridos 0,525 segundos), se produce una variación considerable de la aceleración angular, producido por el movimiento que realiza el robot Pasibot en torno a su posición de equilibrio hasta que han transcurrido en torno a 1,9 segundos, donde el robot Pasibot está quieto en su posición de equilibrio.

Aunque no se pueda observar, la evolución de la Rodilla Trasera I es la misma que la evolución de la Rodilla Delantera I. Lo mismo ocurre con la Rodilla Trasera D y la Rodilla Delantera D. Se debe a que ambos puntos de la pierna izquierda y de la pierna derecha están unidos por un eslabón llamado Rodilla I y Rodilla D respectivamente, lo que hace que su aceleración angular sea la misma. La evolución del Talón I es la misma que la de la Rodilla Delantera I, por ello no se aprecia bien en la figura.

Se puede apreciar que la variación de la aceleración angular de los 4 puntos de las rodillas son los mismos e iguales a la aceleración angular del Talón I. Mientras la aceleración angular del CDG de la Cadera es totalmente distinta y negativa debido a que la Cadera está anclada por diferentes puntos y la forma de equilibrarse es distinta.

La máxima aceleración angular la alcanza el Talón D ( $\alpha = 0,73 \text{ rad/s}^2$ ) con un tiempo de 0,65 segundos. La aceleración mínima la alcanza el CDG de la Cadera con un valor de  $-0,20 \text{ rad/s}^2$  en 1,125 segundos.

### **2º. Caso 2: Robot Pasibot parado y el paso iniciado.**

En este segundo caso, la velocidad que tiene el Motor sigue siendo nula. El robot Pasibot sigue estando inicialmente a una altura de 0,1 metros de altura sobre la pieza que representa el suelo. Pero a diferencia del caso anterior en este caso los pies no están a la misma altura sino que un pie esta encima de otro, es decir, es como si el robot Pasibot hubiera realizado medio paso.

El movimiento que realiza el robot Pasibot en este caso es el siguiente: primero por la fuerza de la gravedad el robot Pasibot cae desde una altura de 0,1 metros y entra en contacto con el suelo. Luego, cuando entra en contacto con el suelo, el robot Pasibot termina por completar el paso con el pie que estaba levantado (en este caso el pie levantado es el pie izquierdo de color rojo). Una vez que tiene los dos pies en contacto con el suelo, el robot Pasibot comienza a ejecutar un segundo paso por la inercia que recibe del primer paso, pero no tiene la suficiente inercia para completar un segundo paso y vuelve hacia atrás el pie derecho. Finalmente el robot Pasibot oscila en torno a su posición de equilibrio hasta que termina por equilibrarse y cesa su movimiento.

A continuación (figura 4.10) se muestra una secuencia de imágenes con el movimiento que realiza el robot Pasibot en este caso.

En la primera imagen se observa la posición inicial del robot Pasibot a 0,1 metros de altura del rectángulo que representa el suelo. Se puede observar como la pierna (de color rojo) que representa la pierna izquierda está iniciando el paso y está por encima de la pierna de color azul que representa la pierna derecha.

En la segunda imagen, el robot Pasibot ya ha caído de su posición inicial y el pie derecho es el que primero entra en contacto con el suelo.

En la tercera imagen, el robot Pasibot termina de dar el paso. Es la pierna izquierda (de color rojo) la que da el paso y entra en contacto con el suelo.

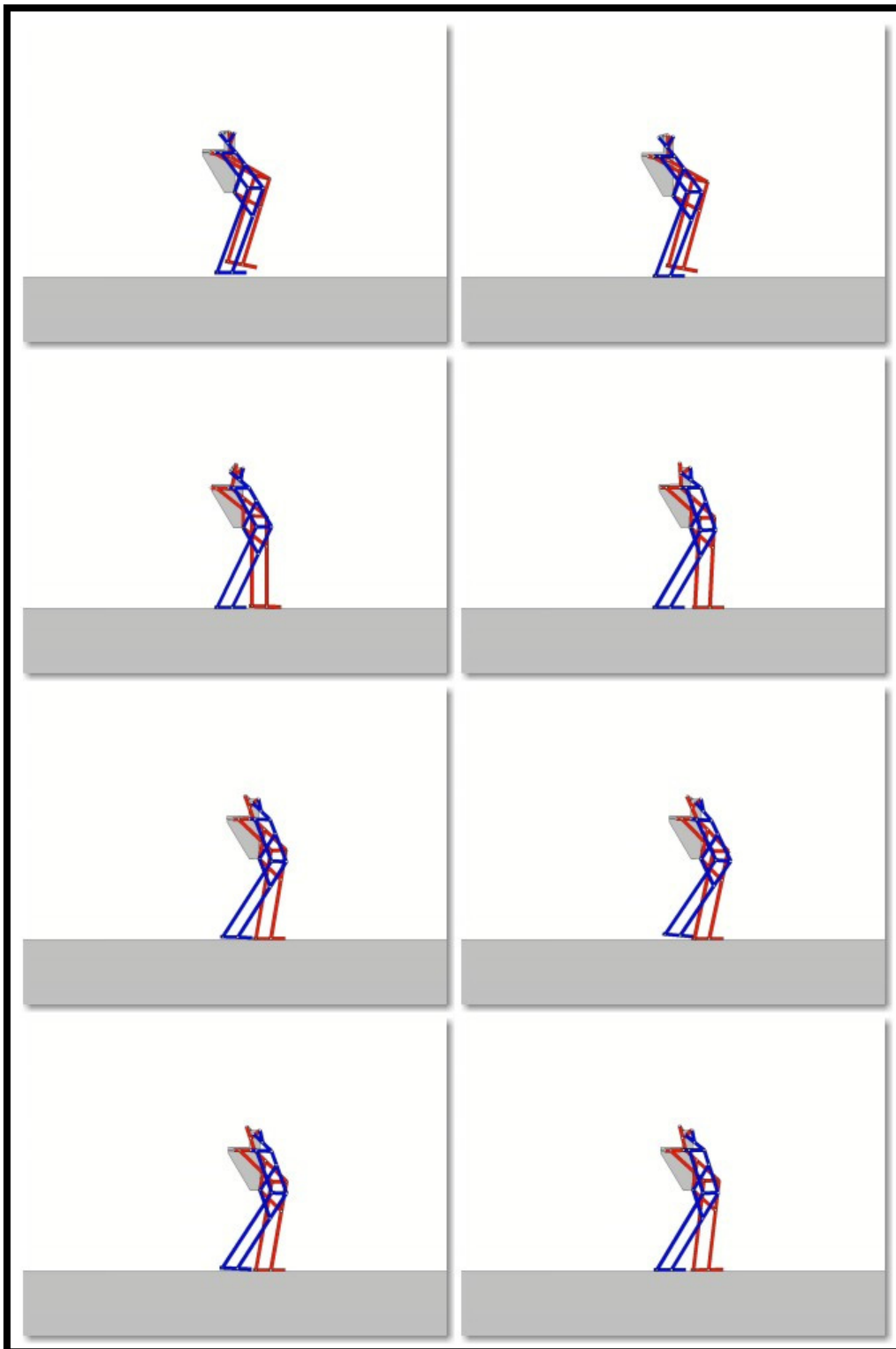
En la cuarta imagen, se ve claramente como ha completado el paso, que estaba iniciado en un principio y el robot Pasibot tiene los dos pies apoyados completamente en el suelo aunque no está equilibrado.

En la quinta y la sexta imagen el robot Pasibot, por la inercia proporcionada al completar el primer paso, trata de realizar un segundo paso levantando la pierna derecha (de color azul). Con ello el robot Pasibot trata de seguir caminando, pero no tiene suficiente inercia para completar otro paso (el Motor no proporciona ninguna fuerza para que el robot Pasibot siga caminando). Como consecuencia, solo puede levantar ligeramente la pierna derecha.

En la séptima y octava imagen, como no tiene la suficiente inercia para completar otro paso, la pierna que inicialmente había iniciado el paso (que en este caso es la pierna derecha de color azul) vuelve a la posición que tenía originalmente. Después sufre un movimiento de oscilación en torno a su posición de equilibrio, hasta que consigue detenerse en su posición de equilibrio.

En el análisis de los resultados se omitirá el intervalo de tiempo en el que el robot Pasibot cae desde la altura inicial. El instante inicial se considerará cuando la pierna derecha (de color azul) este apoyada en el suelo. Ese instante inicial se ocurre cuando han transcurrido 0,475 segundos desde el origen del marcador de tiempo. La explicación de la omisión de ese intervalo de tiempo es que en el modelo real no se dejara caer el robot Pasibot desde ninguna altura, sino que se dejara completamente en contacto con el suelo desde el instante inicial, por lo que no interesa que se estudie lo que ocurre desde los ceros segundos hasta que han transcurrido 0,475 segundos.

El origen del sistema de referencia en este caso, se encuentra en la superficie que representa el suelo y a una distancia aproximada de 0,1 metros del Talón D en el eje X.



**Figura 4.10: Movimiento del robot Pasibot en el caso 2.**

A continuación se ha realizado un análisis cinemático igual que el realizado en el caso 1, exportando los datos obtenidos con Working Model 2D a Microsoft Excel.

• **Posición**

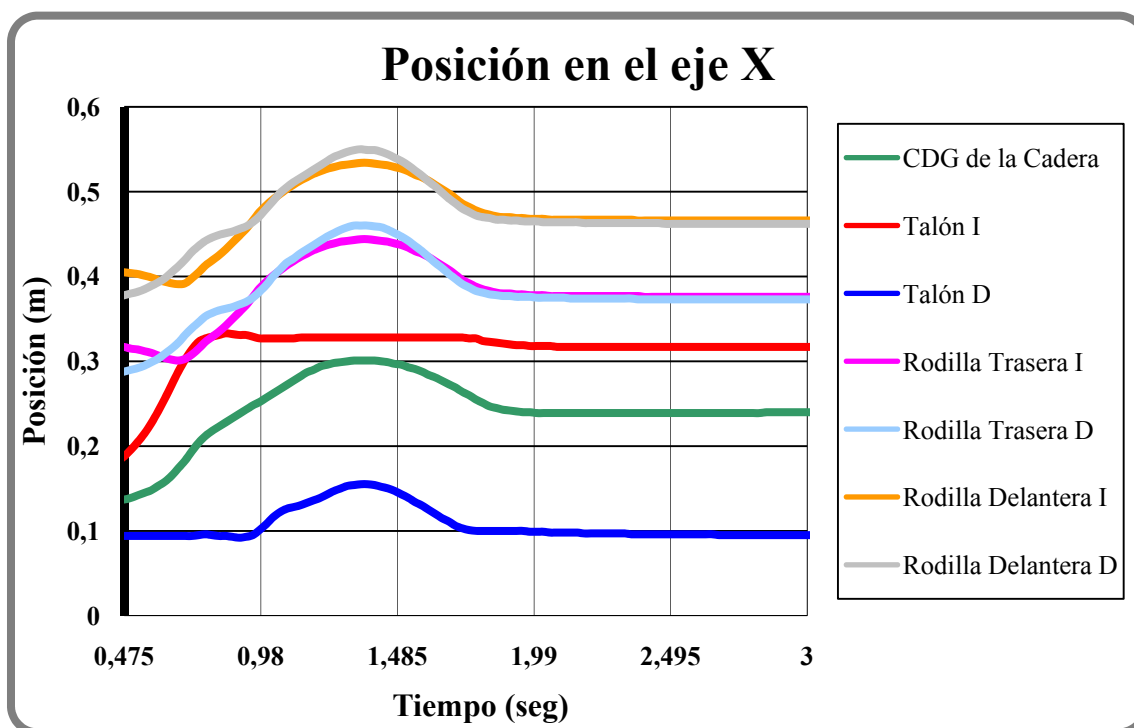


Figura 4.11: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 2).

La figura 4.11 muestra la evolución de la posición de los puntos de estudio del robot Pasibot en el eje X en función del tiempo.

Se observa que la evolución de todos los puntos que se están estudiando es semejante, con valores distintos pero la misma tendencia. Además se puede ver que, transcurridos dos segundos aproximadamente, el robot Pasibot prácticamente no se mueve y por ello no se produce ninguna variación de los valores de la posición en la coordenada X.

También destaca que el Talón D (que es el que primero entra en contacto con el suelo), sufre una variación de la posición en el eje X más tarde que la del resto de componentes. Esto se debe a que mientras que el robot Pasibot completa el primer paso, el Pie D no se mueve. Después, cuando el robot Pasibot ha completado el primer paso y está el Pie I en contacto con el suelo, el Pie D comienza a realizar ese segundo paso ya explicado. Por el contrario el Talón I que es el que está realizando el primer paso, es el pie que más tarde entra en contacto con el suelo y se mueve para terminar de completar el primer paso, por ello la variación de la posición en la coordenada X es mayor.

Además en el Talón D se observa que se produce un incremento en la posición en el eje X, pero después ese incremento se reduce hasta su valor inicial. Esto se debe a la inercia recibida al completar el primer paso. La pierna derecha intenta completar un segundo paso pero como no tiene la suficiente inercia vuelve hacia atrás hasta su posición inicial.

Mientras que el Talón I, nada más entrar la pierna derecha en contacto con el suelo, termina de completar el primer paso por eso se produce una variación considerable de la posición en el eje X.

El resto de puntos de estudio, debido al movimiento del robot Pasibot desde el instante inicial hasta que se ha detenido, sufren un incremento de la posición en el eje X, es decir, porque el robot Pasibot ha avanzado hacia la derecha. Por ello lógicamente la posición de todos los puntos de estudio se incrementarían (excepto el Talón D que como ya se dijo aunque se mueva ligeramente hacia la derecha, vuelve a su posición original por falta de inercia).

El máximo valor de la posición en el eje X que alcanzan todos los puntos de estudio del robot Pasibot, pertenece al instante en el que el Pie D alcanza su máximo valor de la posición en el eje X, coincidiendo con el instante en el que el robot Pasibot está realizando un segundo paso y se detiene al no tener suficiente inercia.

Observando la figura se puede apreciar que el punto de estudio más adelantado respecto al eje X pertenece a la Rodilla Delantera D y la Rodilla Delantera I, algo que se puede apreciar observando la figura 4.10.

Fijándose en los valores se puede apreciar que el incremento que sufren todos los puntos de estudio del robot Pasibot varía entre 0,08 y 0,16 metros, que es la distancia recorrida (en el eje X) por el robot Pasibot al realizar el medio paso.

Se observa que, cuando el Talón D intenta completar un segundo paso, el resto de puntos de estudio también sufre un incremento de la posición en el eje X. Pero como no tiene la suficiente inercia y el Talón D vuelve a su posición original, la posición del resto de puntos (que había sufrido un incremento por ese segundo paso) decrece ese incremento al no poder completarlo.

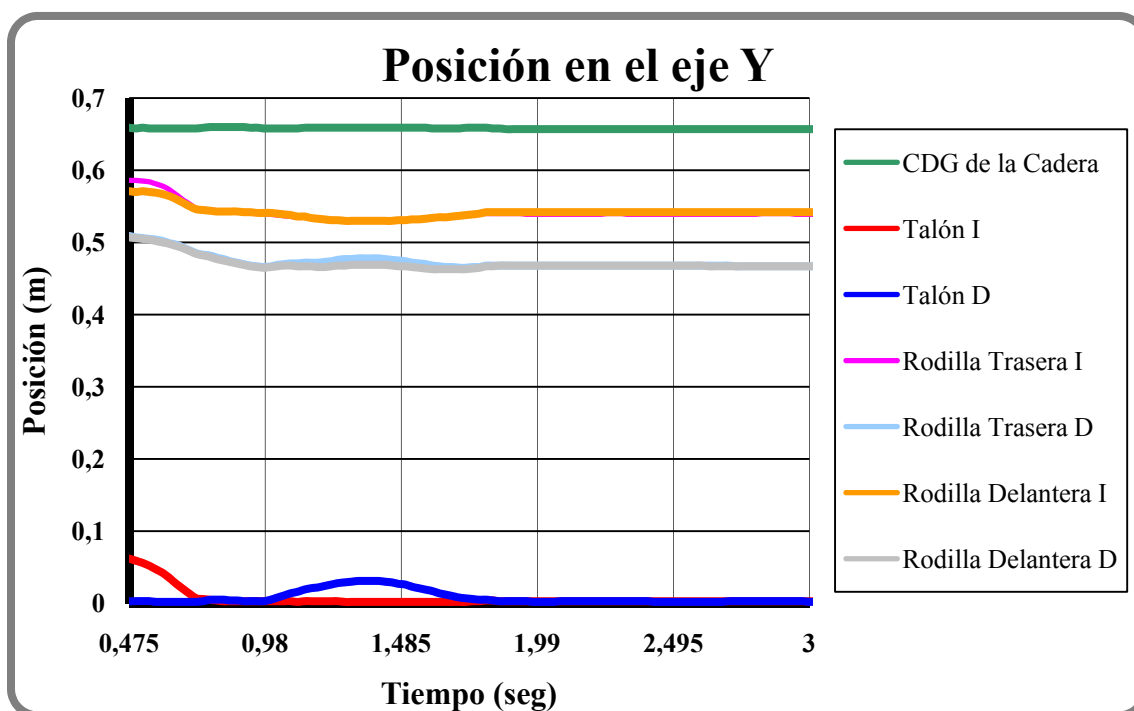


Figura 4.12: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 2).

La figura 4.12 muestra la evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo de los puntos de estudio del robot Pasibot.

Lo primero que se debe destacar es el tiempo que tarda el robot Pasibot en completar el primer paso. Para ello solo se debe ver, desde el instante inicial ( $t=0,475$  segundos), hasta el instante de tiempo en el que el Talón I tiene un valor próximo a cero, que es cuando se puede decir que el Pie I está en contacto con el suelo y el robot Pasibot ha completado el primer paso. Ese tiempo es de 0,35 segundos ( $t= 0,825$  segundos), en el cual el valor de la posición en el eje Y del Talón I es de 0,003 metros.

Se observa, que desde el instante inicial el Talón D está en contacto con el suelo (la altura que marca es 0,003 metros, ya que el Talón D esta en medio del eslabón que representa el Pie D).

También destaca del Talón D, que transcurrido un segundo aproximadamente, sufre un incremento de la posición en el eje Y de cómo máximo 0,028 metros para luego volver a bajar a un valor próximo a cero. El motivo de ello es que el pie derecho trata de dar un segundo paso, pero al no tener la suficiente inercia no puede completar el segundo paso y vuelve a su posición original.

Si se observa la evolución de las rodillas del Robot Pasibot se puede comentar, que en el tiempo el que se completa el primer paso, se produce un descenso de la posición en el eje Y. Después, cuando la pierna derecha se levanta para realizar un segundo paso, la posición en el eje Y de las rodillas que pertenecen a la pierna derecha aumenta, mientras que la posición en el eje Y de las rodillas pertenecientes a la pierna izquierda descienden.

Por último, destacar de esta figura las alturas que tienen cada uno de los componentes del robot Pasibot, siendo el Centro de Gravedad de la Cadera la pieza que más alta está en todo momento y los pies, obviamente, los de menor altura. Además cuando el robot Pasibot está en su posición de equilibrio, la posición en el eje Y de los dos pies tiene un valor próximo a cero metros.



- Velocidad

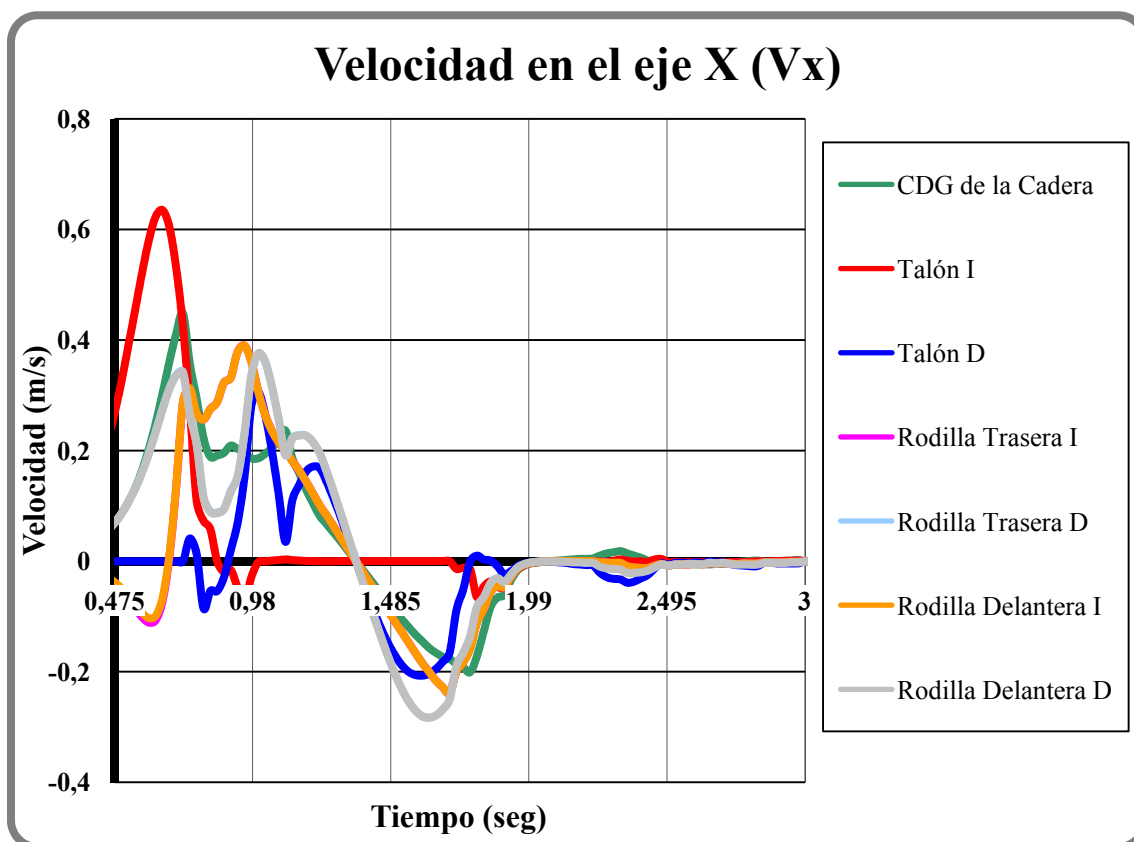


Figura 4.13: Evolución de la velocidad respecto al eje X en función del tiempo (Caso 2).

De esta figura destacar, en primer lugar, que la mayor velocidad en el eje X la tiene el Talón I, que es el que más recorrido realiza (sufrir un mayor incremento de la posición en el eje X, figura 4.11). La máxima velocidad corresponde al instante en el que el Talón I tiene una mayor pendiente de la posición en el eje X (figura 4.11). Sus valores máximos los alcanza para un tiempo de 0,65 segundos con un valor de la velocidad de 0,635 m/s. A partir de ese valor, la velocidad se reduce drásticamente llegando hasta valores próximos a cero cuando han transcurrido aproximadamente 0,85 segundos, correspondiendo este instante al punto de máximo valor de la posición en el eje X.

Si se observa la velocidad del Talón D, inicialmente tiene velocidad nula, luego empieza a sufrir una ligera variación cuando han transcurrido 0,7 segundos aproximadamente, que corresponde a una variación en la posición en el eje X (expresado en la figura 4.11).

Después alcanza una velocidad máxima cuando transcurre 1 segundo con velocidades de 0,306 m/s, correspondiente al instante en el que el pie derecho trata de dar un segundo paso por la inercia de la que dispone (pero no la suficiente para completarlo por eso vuelve a su posición original).

A partir de ese instante como no puede completar el paso, el valor de las velocidades empieza a oscilar entorno a valores próximos a cero, hasta que el robot Pasibot se equilibra completamente y la velocidad del Talón D es prácticamente nula.

Se puede destacar que como las rodillas traseras y las rodillas delanteras del robot Pasibot están unidas por un eslabón denominado Rodilla I o Rodilla D, las velocidades de los puntos pertenecientes a las rodillas en el eje X son iguales, tanto los de la pierna izquierda como los de la pierna derecha. Por ello no se puede apreciar claramente la evolución de la velocidad en el eje X de la Rodilla Trasera I y la Rodilla Trasera D, porque son las mismas que las de la Rodilla Delantera I y la Rodilla Delantera D respectivamente.

Además mediante la figura 4.13 se puede observar cuándo el robot Pasibot está detenido completamente (ya que en las figuras de la posición no se podría apreciar con tanta claridad). El tiempo en que el robot Pasibot no tiene ningún movimiento es de 3 segundos aproximadamente.

Si se observan las figuras 4.11 y 4.12 se podría concluir que la posición no variaba cuando apenas habían transcurrido 1,85 segundos aproximadamente, pero se observa con la figura 4.13 que posteriormente sufre un movimiento mínimo, inapreciable desde el punto de vista de la posición, pero no desde la velocidad.

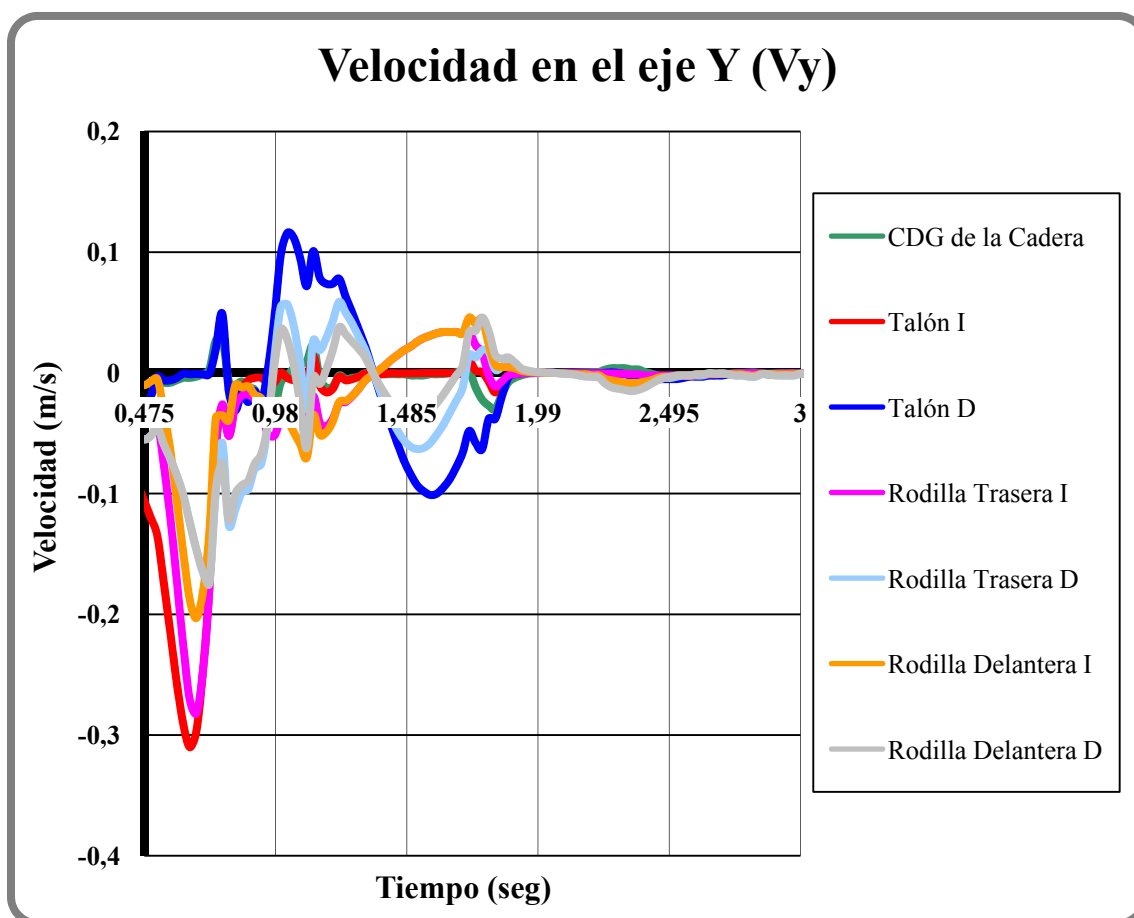


Figura 4.14: Evolución de la velocidad respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 2).

En la figura 4.14 se ha realizado un estudio de la velocidad proyectada en el eje Y de los puntos del robot Pasibot representados en la leyenda de la figura.

Lo primero que destaca en la figura 4.14, como ocurría en la figura 4.13, es que la mayor velocidad la alcanza el Talón I en el punto de máxima pendiente de la posición en el eje Y (figura 4.12). Esta velocidad máxima tiene un valor de -0,31 m/s cuando el tiempo refleja 0,65 segundos. La velocidad negativa viene motivada por la posición de los ejes del sistema de referencia. Después de alcanzar esa velocidad, se produce un descenso notable oscilando cerca de una velocidad nula. El valor próximo a una velocidad nula lo alcanza el Talón I cuando han transcurrido 1,325 segundos.

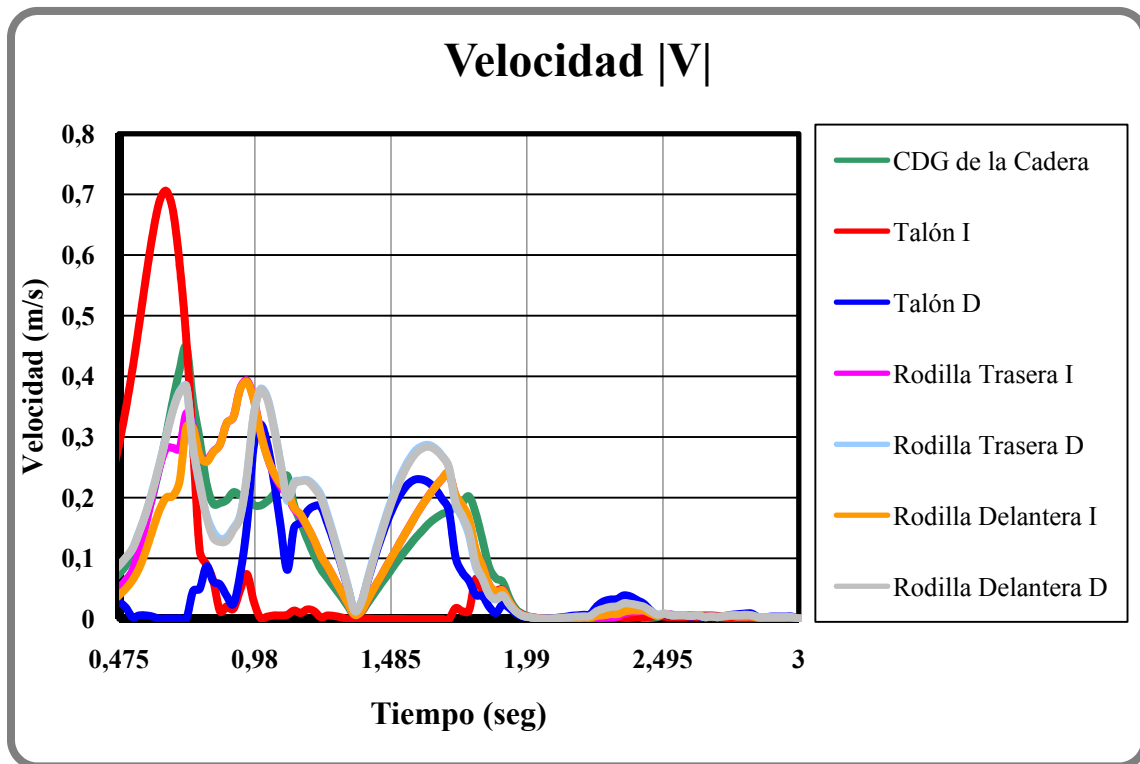
La evolución de la velocidad en el eje Y de las cuatro rodillas del robot Pasibot es semejante a la del Talón I alcanzando menores valores.

La velocidad del Talón D tiene valores cercanos a cero (oscila en torno a 0 m/s) mientras el robot Pasibot está completando el primer paso (porque en ese intervalo de tiempo el Talón D está en contacto con el suelo y apenas tiene movimiento).

Cuando comienza a ejecutar un segundo paso, el Pie D se levanta y la velocidad del Talón D sufre un incremento considerable alcanzando valores máximos de 0,112 m/s cuando han pasado 1,05 segundos (correspondiente en la figura 4.12 al instante de máxima pendiente de la posición en el eje Y del Talón D).

Después, cuando el Talón D alcanza el máximo valor de la posición en el eje Y, como no tiene la suficiente inercia para seguir, el robot Pasibot se queda completamente detenido. Por ello la velocidad de todos los puntos de estudio del eje Y en ese instante tiene valores muy próximos a cero metros por segundo (instante  $t = 1,35$  segundos).

Tras quedarse detenido con la pierna derecha levantada, el robot Pasibot retrocede ligeramente a la posición en la que había completado el primer paso. En ese intervalo de tiempo las velocidades oscilan en torno a cero metros por segundo hasta que finalmente el robot Pasibot se detiene y las velocidades tienen valores próximos a cero.



**Figura 4.15: Evolución del módulo de la velocidad en función del tiempo (Caso 2).**

Lo primero que destaca de la figura 4.15, es que el Talón I tiene un módulo de la velocidad mayor que el resto, alcanzando una velocidad máxima de 0,706 m/s cuando el tiempo refleja 0,65 segundos, perteneciente al instante de tiempo en el que la pendiente de la posición en el eje X e Y del Talón I es máxima (figuras 4.11 y 4.12) y además su velocidad es máxima (figuras 4.13 y 4.14).

El CDG de la Cadera, la Rodilla Trasera I, la Rodilla Delantera I, la Rodilla Trasera D y la Rodilla Delantera D sufren una evolución semejante. El Centro de Gravedad de la Cadera alcanza la mayor velocidad (de 0,448 m/s en 0,725 segundos).

Si se observa el Talón D, mientras el robot Pasibot está completando el primer paso, su velocidad es nula. Cuando el robot Pasibot comienza a levantar la pierna derecha para hacer un segundo paso, la velocidad del Talón D aumenta alcanzando un valor máximo cuando la pendiente de la posición es máxima.

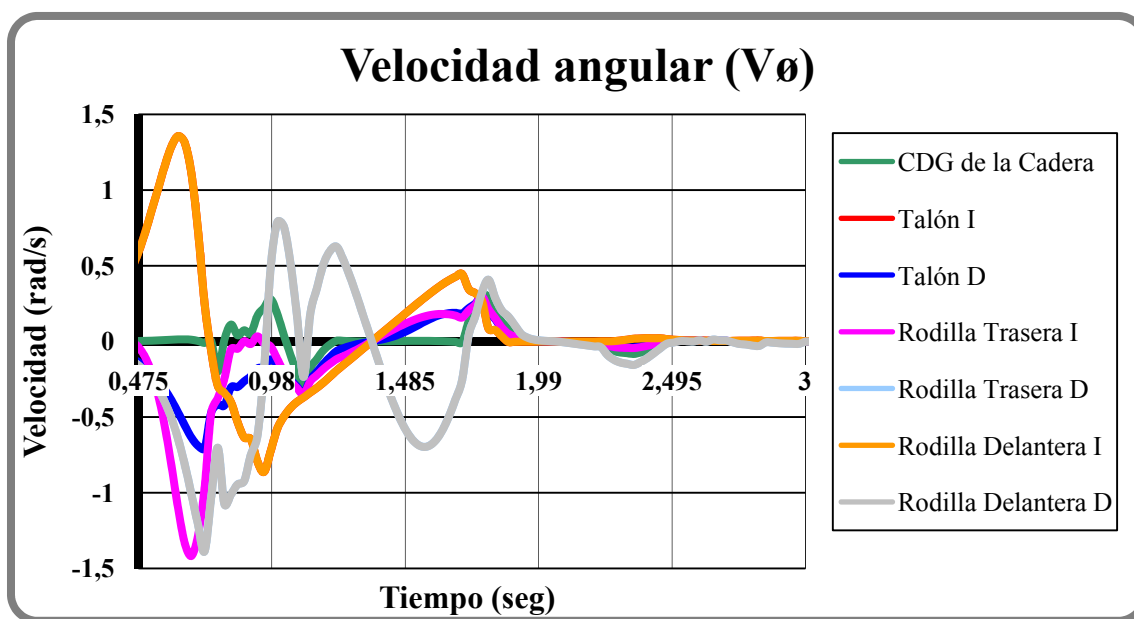


Figura 4.16: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 2).

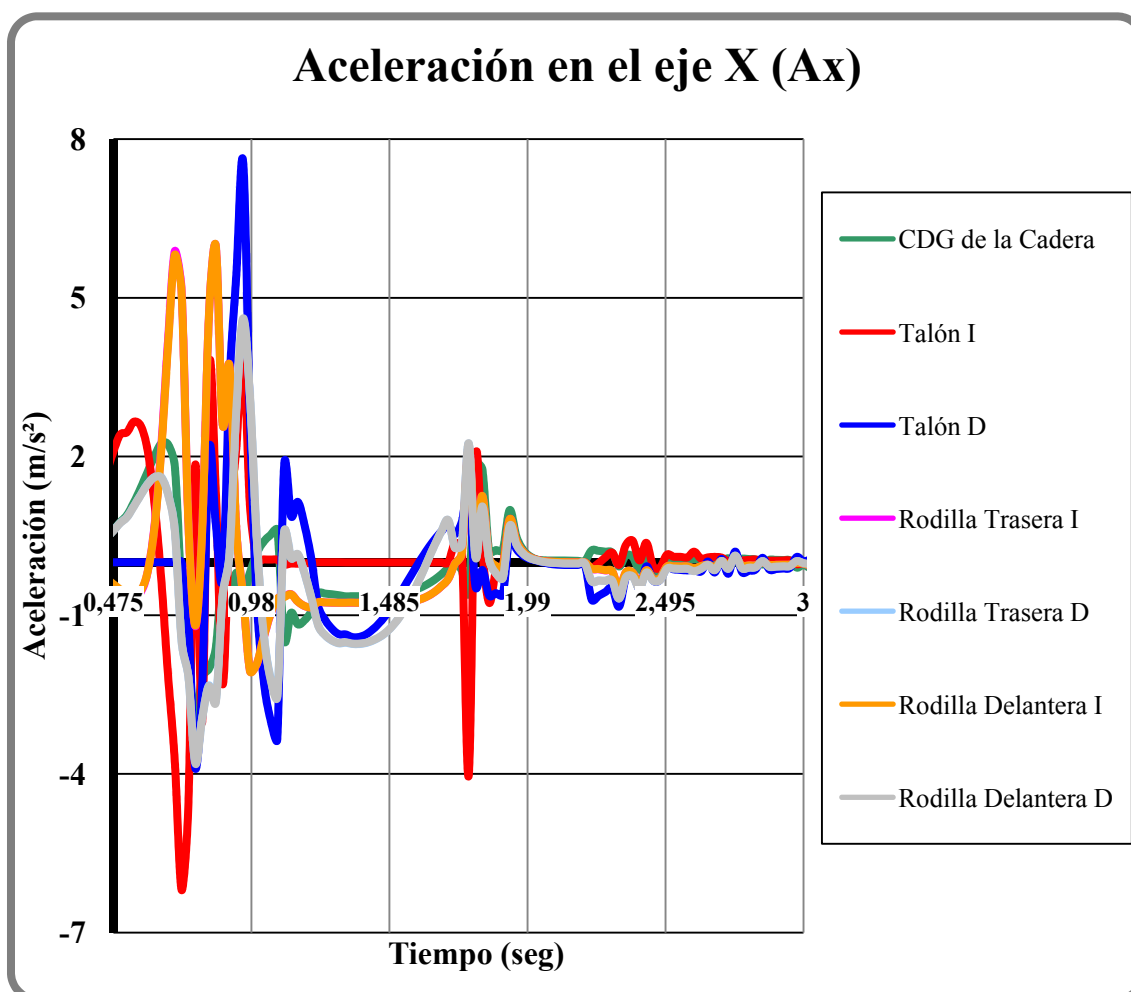
Desde el instante inicial, las velocidades de todos los puntos que se están estudiando sufren un incremento (excepto el CDG de la Cadera). La Rodilla Delantera I y el Talón I (que son semejantes) en valores positivos y el resto en valores negativos, excepto el CDG de la Cadera que la velocidad angular en un corto intervalo de tiempo (de 0,475 a 0,75 segundos) es próxima a cero.

Los valores máximos que se alcanzan de velocidad angular positiva son de 1,36 rad/s para un tiempo de 0,625 segundos en el Talón I y la Rodilla Delantera I. La mayor velocidad angular negativa la alcanza la Rodilla Trasera I (-1,42 rad/s en 0,675 segundos). Destacar que la evolución de la velocidad angular de la Rodilla Delantera D es la misma que la de la Rodilla Trasera D por ello no se puede apreciar con claridad.

Después de que el robot Pasibot realice el primer paso e intentando realizar un segundo paso, la velocidad angular tiende a sufrir una oscilación cada vez menor hasta alcanzar valores próximos a cero cuando han transcurrido casi 3 segundos.

Destaca un ligero incremento de la velocidad angular cuando han transcurrido 2,225 segundos, para que luego tienda otra vez a cero. Esta ligera variación se debe al movimiento de oscilación que realiza el robot Pasibot para colocarse en su posición de equilibrio, una vez posicionado en dicho lugar el robot Pasibot se queda quieto y su velocidad se aproxima a cero.

- **Aceleración**



**Figura 4.17: Evolución de la aceleración respecto al eje X en función del tiempo (Caso 2).**

La figura 4.17 refleja la aceleración proyectada sobre el eje X de los diferentes puntos de estudio reflejados en la leyenda de la figura.

Lo primero que se puede destacar de la figura 4.17, si se observa el Talón I, es que cuando la pierna izquierda está bajando para completar el primer paso, el Talón I sufre una aceleración que hace aumentar la velocidad (figura 4.13), con una aceleración máxima de 2,587  $m/s^2$  cuando el tiempo refleja 0,575 segundos. Pero nada más alcanzar ese máximo se produce un descenso de la aceleración, que llega a 0  $m/s^2$  cuando han transcurrido 0,65 segundos (ese instante coincide con la velocidad máxima del Talón I en el eje X como se puede ver en la figura 4.13).

Luego alcanza deceleraciones (aceleraciones negativas) para frenar el pie izquierdo cuando entra en contacto con el suelo. La deceleración máxima es de  $-6,194 \text{ m/s}^2$  en un tiempo de 0,725 segundos.

Tras alcanzar ese valor, la aceleración en el eje X del Talón I se aproxima a cero. Excepto en el intervalo de tiempo desde 1,7 hasta 2,05 segundos en que la aceleración en el eje X del Talón I oscila para luego tender a cero. Esto se debe al ligero movimiento que realiza la pierna izquierda para equilibrarse en torno a su posición de equilibrio.

En esta figura también destaca el segundo paso que intenta realizar el robot Pasibot. Cuando el periodo de tiempo se va aproximando a un segundo se observa cómo se produce un gran incremento de la aceleración del Talón D en el eje X en sentido positivo (antes de ese tiempo la aceleración del Talón D tiene valores muy próximos a cero, porque está en continuo contacto con el suelo y no sufre ningún movimiento), que alcanza un valor máximo de  $7,57 \text{ m/s}^2$  cuando han transcurrido 0,95 segundos. Esto se debe a que una vez que el pie izquierdo ha terminado de dar el primer paso, por la inercia que produce, el pie derecho trata de dar un segundo paso y por ello comienza a levantarse el Talón D incrementando su velocidad y por ello incrementando su aceleración.

Por último, destacar que la aceleración de todos los puntos de estudio se aproximan a cero metros por segundo para ya no sufrir ninguna variación cuando han transcurrido entre 2,5 y 3 segundos.



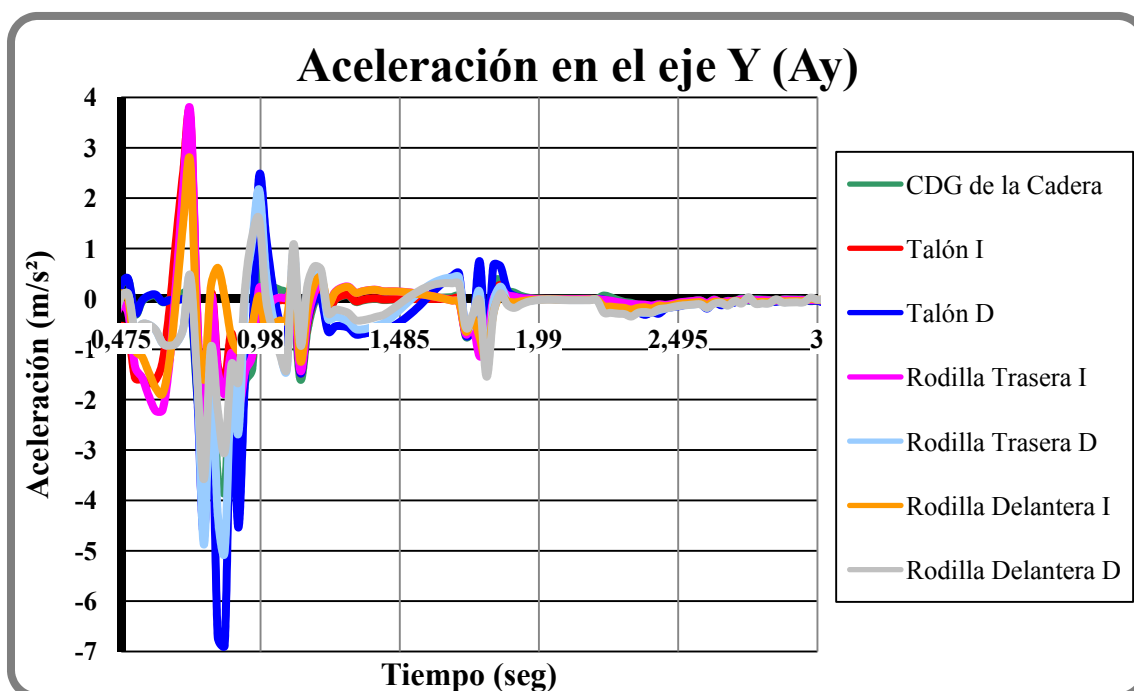


Figura 4.18: Evolución de la aceleración respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 2).

En el intervalo de tiempo en el que el robot Pasibot está completando el primer paso, la Rodilla Trasera I, la Rodilla Delantera I y el Talón I sufren una deceleración como consecuencia de las velocidades negativas que alcanzan (figura 4.14). La mayor deceleración en este intervalo lo alcanza la Rodilla Trasera I con un valor de  $-2,225 \text{ m/s}^2$  en 0,6 segundos. Cuando el tiempo marca 0,65 segundos, la aceleración de estos componentes se aproximan a  $0 \text{ m/s}^2$ . Para que un instante después, con una pendiente positiva, alcance una aceleración máxima positiva de  $3,735 \text{ m/s}^2$  perteneciente a la Rodilla Trasera I y el Talón I. Después tanto la Rodilla Trasera I, como la Rodilla Delantera I y el Talón I tienen una aceleración en el eje Y que oscila en torno a una aceleración nula para finalmente alcanzar dicha aceleración.

Fijándose en el Talón D, en un intervalo inicial que va desde 0,475 hasta 0,725 segundos la aceleración tiene valores próximos a  $0 \text{ m/s}^2$ , intervalo en el que se completa el primer paso y en el que Pie D está fijo en el suelo con una aceleración del Talón D nula. Cuando el robot Pasibot está iniciando un segundo paso, el pie derecho se levanta y con ello se produce una deceleración del Talón D, con un valor máximo de  $-6,878 \text{ m/s}^2$  en 0,85 segundos. Tras este valor, su aceleración toma valores próximos a  $0 \text{ m/s}^2$  cuando han pasado entre 2,5 y 3 segundos.

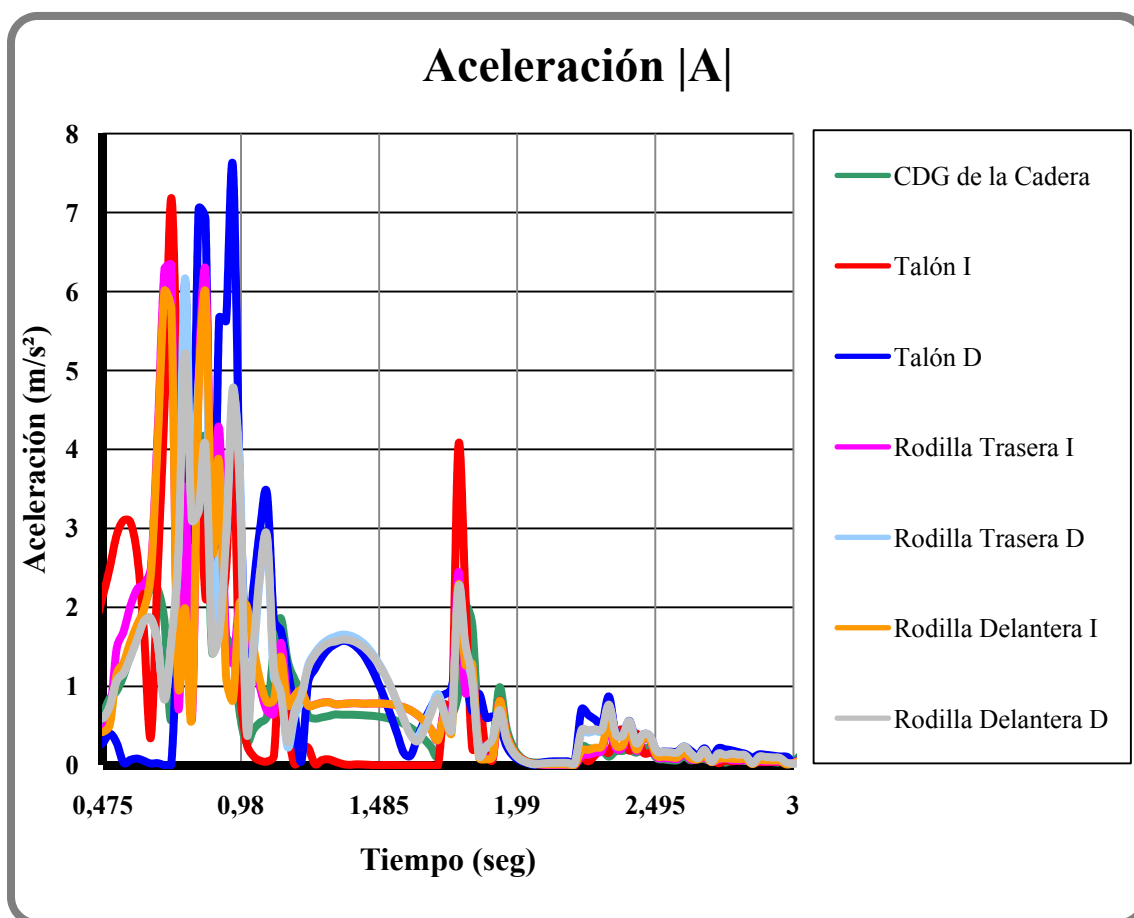


Figura 4.19: Evolución del módulo de la aceleración en función del tiempo (Caso 2).

La figura 4.19 representa la evolución del módulo de la aceleración de los diferentes puntos de estudio del robot Pasibot en función del tiempo.

Si se analiza cada pierna del robot Pasibot por separado, se observa que en la pierna izquierda a partir del instante inicial la Rodilla Delantera I, la Rodilla Trasera I y el Talón I sufren una evolución semejante con valores próximos entre sí. Por ello en el instante inicial los elementos pertenecientes a la pierna izquierda sufren un incremento del módulo de la aceleración. Este incremento se debe al instante en el que el robot Pasibot está completando el primer paso (con la pierna izquierda). La máxima aceleración que alcanza la pierna izquierda toma un valor de  $7,184 \text{ m/s}^2$  cuando han transcurrido  $0,725$  segundos y pertenece al Talón I.

Tras alcanzar ese valor, el módulo de la aceleración de los componentes de la pierna izquierda oscilan hasta que se aproximan a valores de  $0 \text{ m/s}^2$ .

Analizando los componentes que constituyen la pierna derecha, se ve que el Talón D, cuando el robot Pasibot está completando el primer paso, tiene valores próximos a  $0 \text{ m/s}^2$ . Mientras que la Rodilla Delantera D y la Rodilla Trasera D sufren una aceleración considerable.

Cuando el robot Pasibot comienza a ejecutar el segundo paso, el módulo de la aceleración del Talón D sufre un incremento considerable de la aceleración (con un valor máximo de  $7,595 \text{ m/s}^2$  cuando el tiempo refleja 0,95 segundos), al igual que la Rodilla Delantera D y la Rodilla Trasera D. Finalmente los tres componentes de la pierna derecha oscilan hasta alcanzar un valor próximo a  $0 \text{ m/s}^2$ .

Por último se puede destacar, como ha ocurrido en figuras anteriores, que en un intervalo de tiempo comprendido entre 2,2 y 2,6 segundos se produce un incremento del módulo de la aceleración en todas las componentes que se están estudiando del robot Pasibot. Esto viene motivado por el movimiento que realiza el robot Pasibot para equilibrarse oscilando en torno a su posición de equilibrio. Finalmente el robot Pasibot se sitúa en esa posición de equilibrio y se detiene alcanzando unas aceleraciones próximas a  $0 \text{ m/s}^2$ .

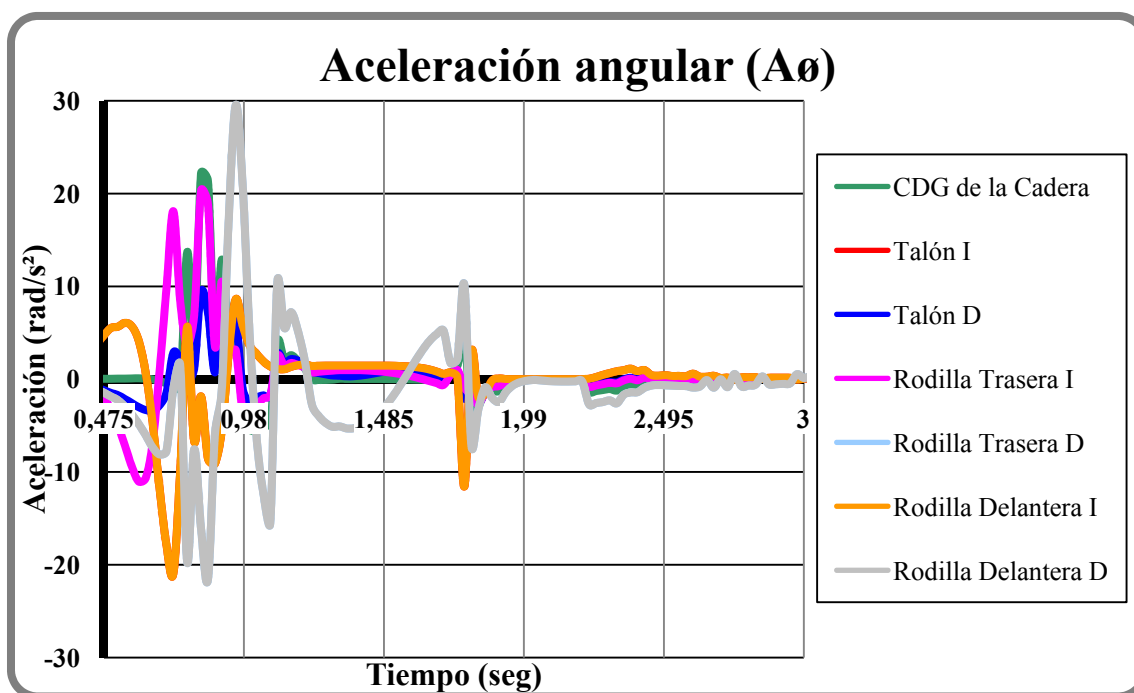


Figura 4.20: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 2).

Las aceleraciones angulares que se alcanzan son considerables, alcanzando un valor máximo la Rodilla Delantera D de  $29,52 \text{ rad/s}^2$  para un tiempo de  $0,95$  segundos y una aceleración negativa máxima de  $-21,55 \text{ rad/s}^2$  para un tiempo de  $0,85$  segundos

También se debe destacar que, por motivo de que realizan la misma evolución de la velocidad angular (figura 4.16), la evolución de la aceleración angular de la Rodilla Delantera I es la misma que la del Talón I, ocurriendo lo mismo con la evolución de la Rodilla Delantera D que es la misma que la de la Rodilla Trasera D.

Si se observa la evolución de la aceleración angular de todas las partes del robot Pasibot que se están estudiando, se ve que para un tiempo cercano a dos segundos, el valor se aproxima a cero. Esta tendencia de  $0 \text{ rad/s}^2$  solo varía en el intervalo de tiempo comprendido entre  $2,2$  y  $2,6$  segundos.

Se debe comentar por último que la variación de la aceleración angular de cada componente viene precedido por el paso que está realizando el robot Pasibot, como por ejemplo, cuando el robot Pasibot intenta realizar un segundo paso, la Rodilla Delantera D, la Rodilla Trasera D y el Talón D sufre una oscilación considerable desde el punto de vista de la aceleración angular.

### **3º. Caso 3: Robot Pasibot en movimiento realizando un paso completo considerando un pie anclado al suelo.**

En este caso se considerará como posición inicial del robot Pasibot con los dos pies apoyados en el suelo (la distancia que existe entre los dos pies y el rectángulo que actúa de suelo se puede considerar prácticamente despreciable).

Como Working Model 2D provoca numerosos problemas a la hora de realizar la simulación por el complejo sistema que se pretende simular, se ha realizado una simplificación del movimiento del robot Pasibot para su fácil comprensión y así el programa no tenga problemas a la hora de realizar la simulación. En este caso la simplificación que se ha realizado en el robot Pasibot es anclar el Pie D para que no realice movimiento alguno.

En este caso la velocidad que se ha aplicado al Motor del robot Pasibot para producir su movimiento es la velocidad que proporciona el programa WM por defecto, que se corresponde con un valor de valor de 59,296 grados por segundo (equivalente a 1 rad/s). Esta velocidad del Motor provoca que el movimiento (paso) del robot Pasibot que se está estudiando en este caso tenga una duración aproximada de cuatro segundos. Siendo un tiempo aceptable para que el robot Pasibot realice un paso, ya que a esa velocidad, permite realizar unos 15 pasos por minuto aproximadamente.

El movimiento que realiza el robot Pasibot en este caso es muy sencillo, con el Pie D anclado al suelo y el Pie I apoyado en el suelo, el robot Pasibot, mediante la fuerza del Motor que provoca el movimiento de la manivela, hace ejecutar el movimiento de levantamiento de la pierna izquierda del robot Pasibot para completar un paso hasta volver a apoyar el Pie I en el suelo al completar el paso.

A continuación se observa, en la figura 4.21, una secuencia de imágenes del movimiento que realiza robot Pasibot en este caso.

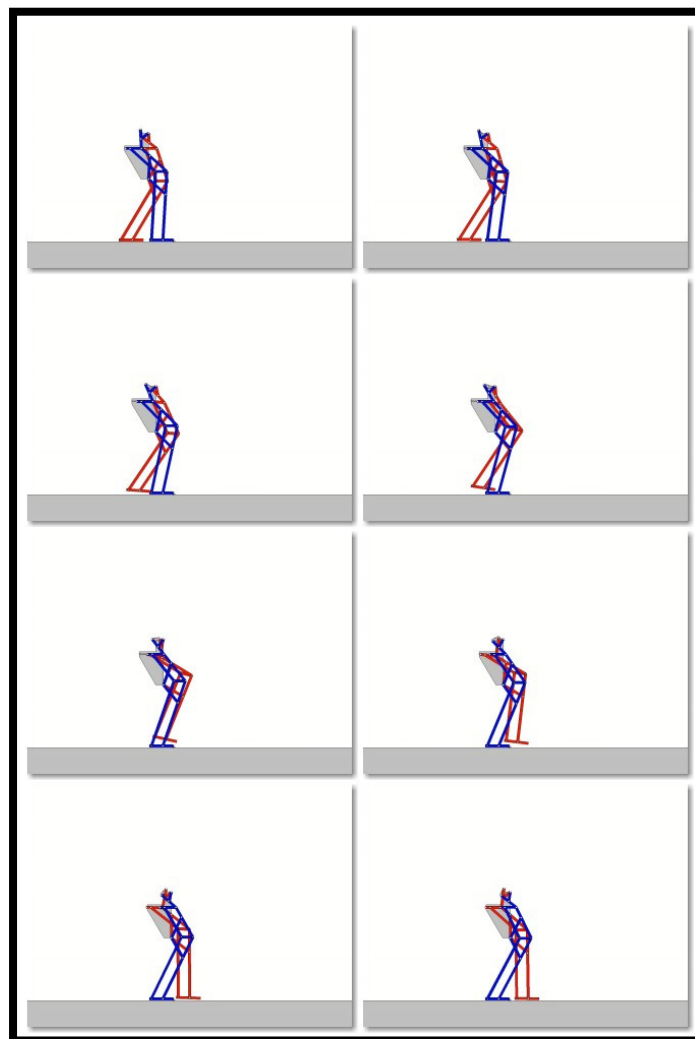
En las dos primeras imágenes se observa la posición original de robot Pasibot con los dos pies apoyados en el suelo y el pie derecho, aunque no se pueda observar con claridad, está anclado al suelo.

En la tercera y la cuarta imagen se observa el levantamiento de la pierna izquierda iniciando el paso, producido por la fuerza que realiza el Motor realizando un movimiento en la manivela que hace levantar la pierna izquierda.

En la quinta y la sexta imagen se produce un descenso del Pie I cuando ha completado más de la mitad del paso, este movimiento es el que se realizaba en el caso dos.

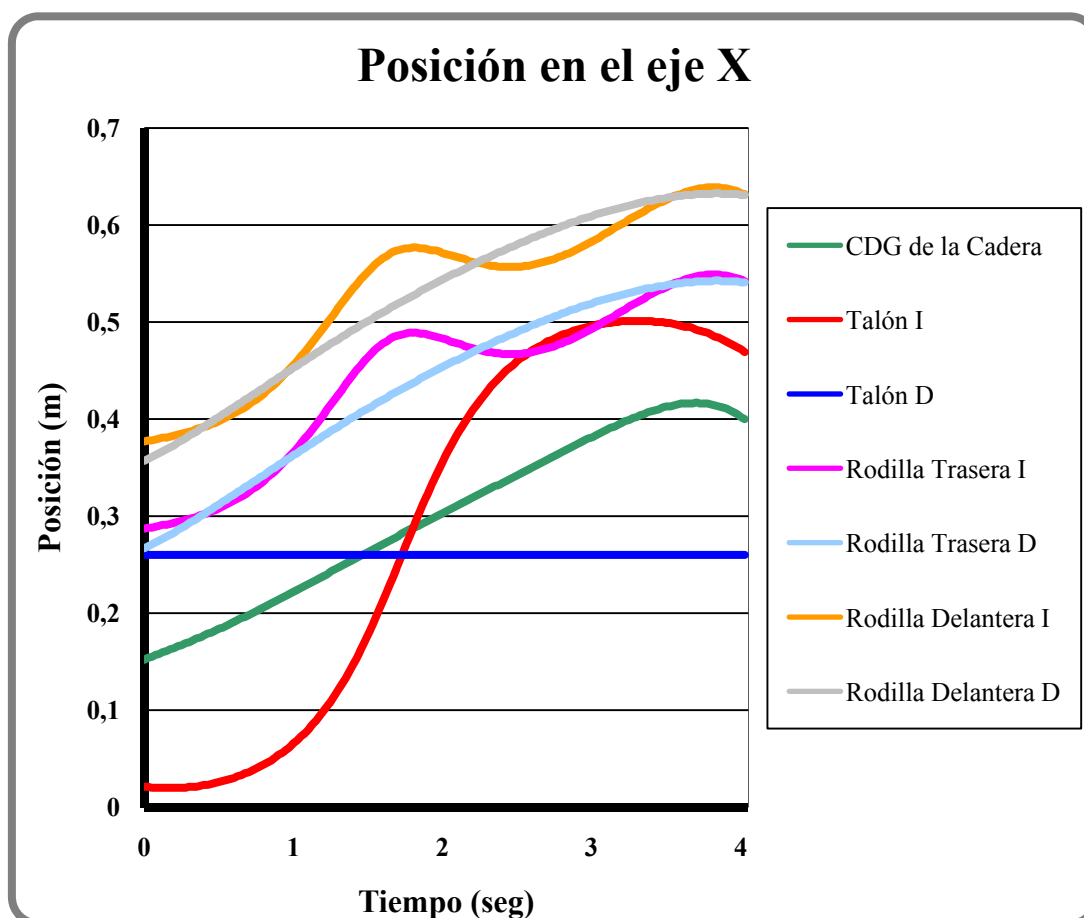
Finalmente en la séptima y octava imagen es cuando el robot Pasibot completa el paso apoyando el Pie I y completando totalmente el paso.

El origen del sistema de referencia en este caso está colocado en la superficie que representa el suelo y lo más próximo posible al Talón I de la pierna izquierda.



**Figura 4.21: Movimiento del Pasibot en el caso 3.**

- **Posición**



**Figura 4.22: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 3).**

La figura 4.22 destaca la evolución que sufre los diferentes puntos de estudio del robot Pasibot en función del tiempo cuando el robot ejecuta un paso completo con el pie derecho anclado.

En la figura 4.22 cabe destacar los siguientes aspectos. En primer lugar destaca que la posición X del Talón D no varía a medida que aumenta el tiempo, con un valor de 0,26 metros para cualquier instante de tiempo (indica la posición del Talón D sobre los ejes establecidos por el programa).

Destacar además, el movimiento que realiza el Talón I, que inicialmente está cercano al origen de coordenadas del sistema de referencia (el origen del sistema de referencia se ha situado lo más próximo posible al Talón I).

Cuando inicia el paso sufre un incremento de la posición en el eje X. El incremento que sufre de la posición es de aproximadamente 0,486 metros, que es la distancia que debe avanzar cada pie para completar un paso. Luego se observa un ligero descenso cuando ya ha alcanzado su máximo, esa reducción de la posición es de aproximadamente 0,037 metros.

Esta reducción no se tendría que dar si el pie derecho no estuviera anclado, porque la reducción no se haría y se levantaría el pie derecho para hacer un segundo paso. Pero como está anclado el pie izquierdo retrocede ligeramente.

También destaca que la evolución de la posición en el eje X es prácticamente la misma en la Rodilla Delantera D, la Rodilla Trasera D y el CDG de la Cadera. Conservando en todo instante la diferencia de la posición y siendo sus evoluciones en todo instante de tiempo paralelas.

Destaca que la posición del CDG de la Cadera en el eje X esta inicialmente por encima del Pie I y por debajo del Pie D, y al completar el paso la posición en el eje X del CDG de la Cadera está por debajo del Pie I y por encima del Pie D. Esto hace que el Centro de Gravedad de la Cadera este en todo instante entre los dos pies equilibrando al robot Pasibot para que no se pueda caer.



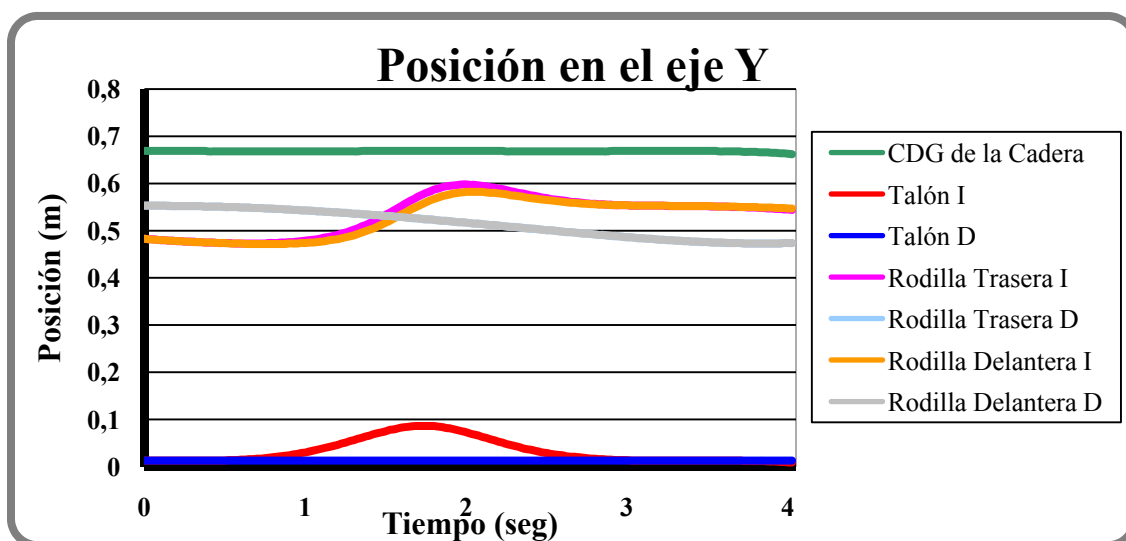


Figura 4.23: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).

En la figura, puede destacarse el movimiento del Talón I y el pie izquierdo que realiza para completar el paso. El intervalo de tiempo en el que el robot Pasibot realiza un paso va desde que el tiempo marca 0,5 segundos hasta que han transcurrido aproximadamente 3 segundos. La altura máxima que alcanza el Talón I para ejecutar un paso es de 0,073 metros desde su posición inicial.

La altura del CDG de la Cadera no varía prácticamente cuando el robot Pasibot camina. Solo se produce una ligera variación al final del tiempo de estudio, pero esta bajada es porque el pie derecho está anclado y baja ligeramente el pie izquierdo una mínima cantidad. Si caminara normalmente la altura del CDG de la Cadera no variaría.

Otra evolución de interés es la que sufren las rodillas de la pierna izquierda (tanto la Rodilla Trasera I como la Rodilla Delantera I), que lógicamente aumenta su valor cuando el Talón I se levanta y por ello también se produce el levantamiento de la pierna izquierda en general. Además cuando la pieza izquierda baja para completar el paso, la altura de las rodillas también baja, motivo de ello es que el pie y el eslabón denominado rodilla esta en todo instante en paralelo porque están unidas por la Tibia y el Peroné, variando la posición de la misma forma.

La Rodilla Trasera D tiene la misma evolución que la Rodilla Delantera D, cuya evolución es descendente porque aunque el Pie D este anclado, la Tibia y el Peroné se inclinan reduciendo un poco la altura de las rodillas de la pierna derecha.

- **Velocidad**

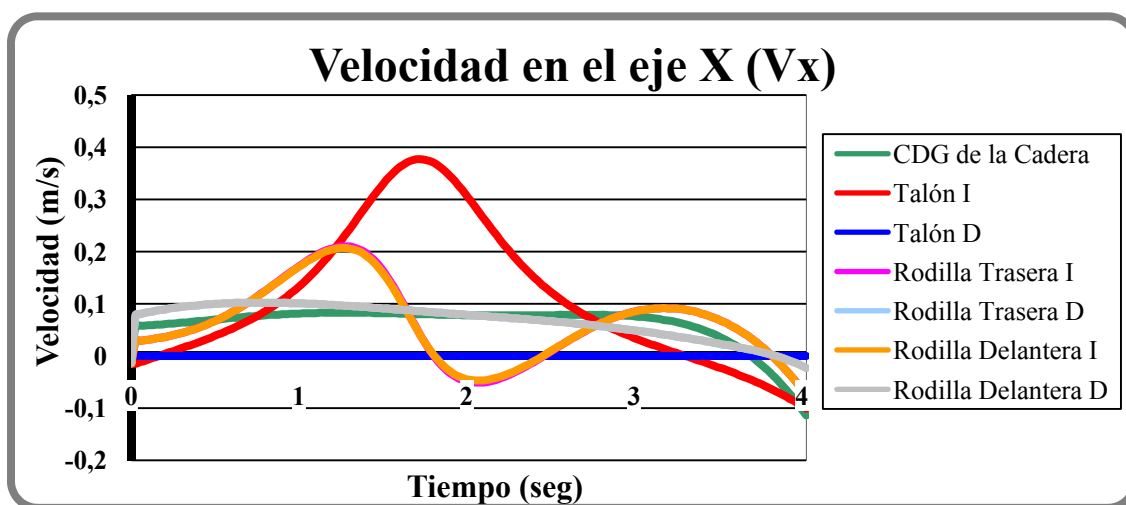


Figura 4.24: Evolución de la velocidad respecto al eje X en función del tiempo (Caso 3).

Lo primero que más destaca en la figura 4.24 es la evolución de la velocidad en el eje X del Talón I, que inicialmente tiene una velocidad ligeramente negativa. Según comienza a dar el paso, se incrementa la velocidad alcanzando su velocidad máxima de 0,376 m/s transcurridos 1,75 segundos cuando el Talón I alcanza la altura máxima en el eje vertical (figura 4.23). A partir de ese punto, el pie izquierdo comienza a bajar y se reduce la velocidad del Talón I alcanzando finalmente valores negativos.

Se observa también que las evoluciones de la velocidad de la Rodilla Delantera I y de la Rodilla Trasera I son prácticamente iguales, y que cuando la pierna izquierda empieza a realizar el paso, la velocidad de las rodillas de la pierna izquierda aumenta. Llama la atención la evolución de las velocidades de las rodillas de la pierna izquierda, que aunque el Talón I siga aumentando la velocidad, la velocidad de las rodillas descende, para luego cuando ya ha completado el paso aumentar y luego volver a descender. Esta explicación se puede obtener de la figura 4.22 (donde se observa la posición en el eje X). Según descende la posición en el eje X se reduce la velocidad en el eje X, cuando aumenta la posición en el eje X también lo hace en la velocidad.

Por último aclarar que la evolución de la velocidad en el eje X de la Rodilla Delantera D es la misma que la de la Rodilla Trasera D. Porque están unidos por el eslabón denominado Rodilla D y está paralela con el pie a través de la Tibia y el Peroné.

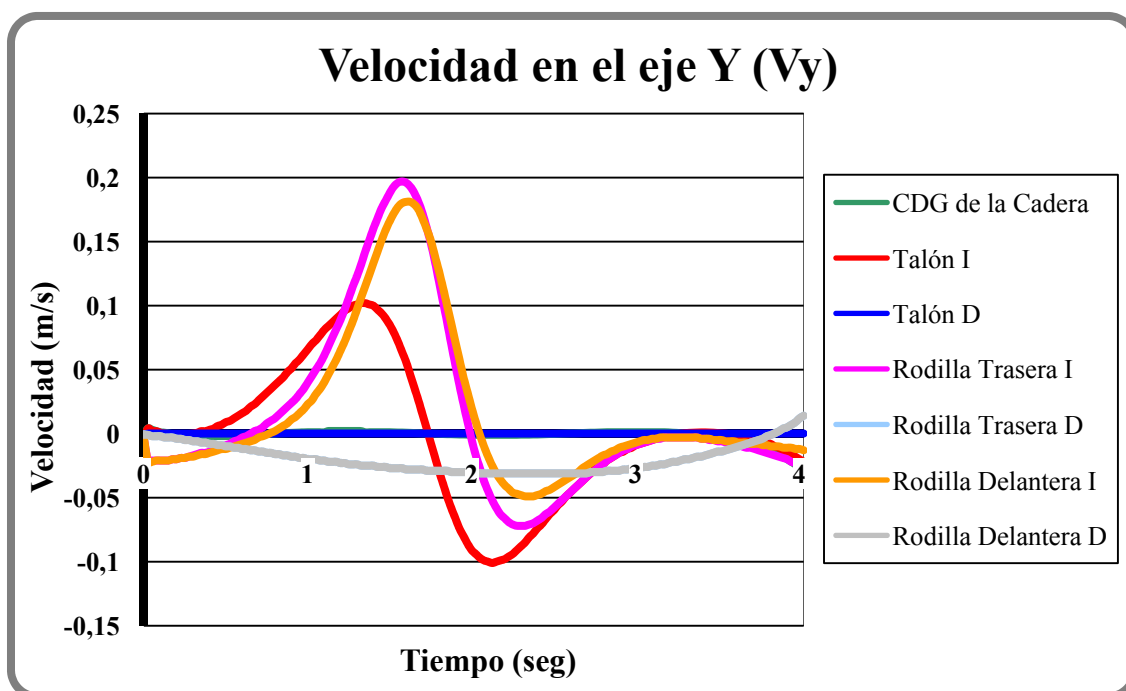


Figura 4.25: Evolución de la velocidad respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 3).

El CDG de la Cadera como se observaba en la figura 4.23 no sufre variación de la posición en el eje vertical, por ello la velocidad del CDG de la Cadera es próximo a cero, motivo por el cual no se puede apreciar su evolución en esta figura.

Destaca que la velocidad de la Rodilla Trasera I y la Rodilla Delantera I son semejantes en cualquier instante de tiempo y además alcanzan una velocidad máxima positiva mayor que la del Talón I, alcanzando valores máximos de 0,196 m/s para un tiempo de 1,6 segundos, luego se produce un descenso destacado.

Aunque no se pueda observar con claridad en esta figura, la velocidad en el eje vertical de la Rodilla Trasera D sigue la misma evolución que la velocidad de la Rodilla Delantera D.

La velocidad máxima que alcanza el Talón I en positivo es de 0,101 m/s cuando han transcurrido 1,375 segundos. Y alcanzando un valor máximo negativo de -0,101 m/s cuando han transcurrido 2,125 segundos.

Después de completar un primer paso se producen unas variaciones de la velocidad que no se darían si el Pie D no estuviera anclado al suelo y el robot Pasibot continuara caminando.

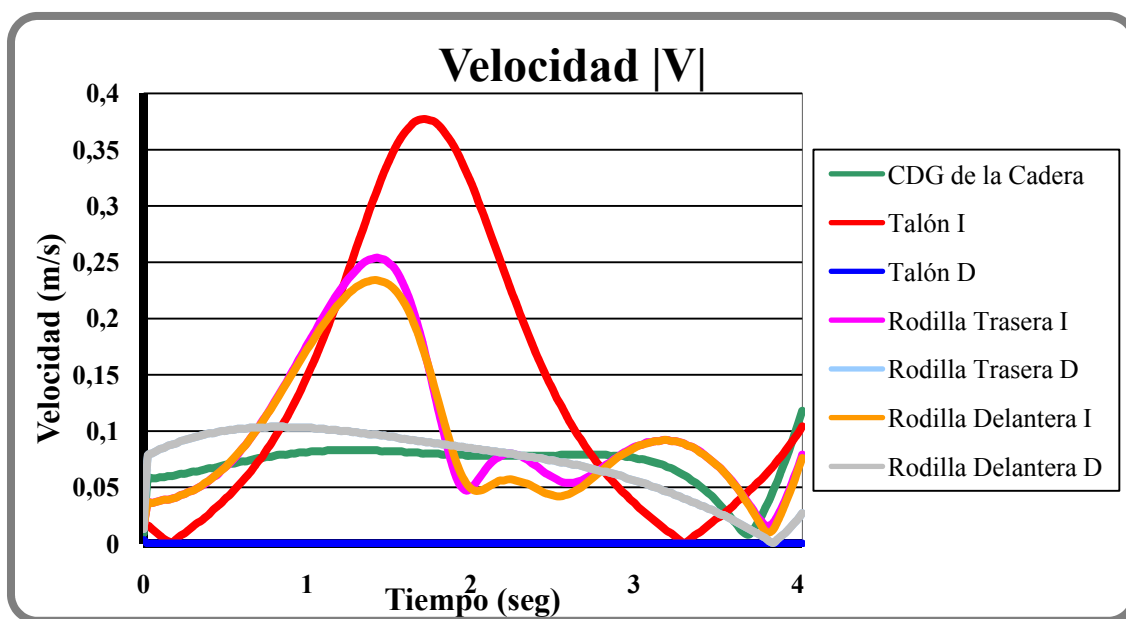


Figura 4.26: Evolución del módulo de la velocidad en función del tiempo (Caso 3).

Como se ha comentado con anterioridad, la velocidad del pie derecho y por tanto del Talón D es nula porque está anclado al suelo. El Talón I que, por ser la parte del robot Pasibot que se está estudiando que más se mueve, sufre un mayor módulo de la velocidad, alcanzado valores máximos de 0,377 m/s cuando han transcurrido 1,725 segundos. En el Talón I se puede destacar además el tiempo en el que se apoya el pie izquierdo en el suelo y completa el paso, que es donde su módulo obtiene el valor próximo a cero. En este caso el tiempo transcurrido es 3,325 segundos.

Luego, la parte del robot Pasibot que más se mueve de las que se están estudiando son la Rodilla Trasera I y la Rodilla Delantera I, que corresponden a la pierna izquierda, que es la que realiza el paso. Sufren una evolución semejante las dos rodillas de la pierna izquierda porque están unidas por un eslabón denominado Rodilla I, que se mantiene en todo instante de tiempo en paralelo con el pie izquierdo. Los máximos valores que alcanzan las rodillas de la pierna izquierda son 0,254 m/s cuando el contador de tiempo refleja 1,425 segundos.

La evolución de la Rodilla Delantera D es semejante a la evolución de la Rodilla Trasera D, por eso no se puede observar en esta figura.

El módulo de la velocidad del CDG de la Cadera no es muy alto, pero está totalmente influenciado por lo que avanza la Cadera en el eje X.

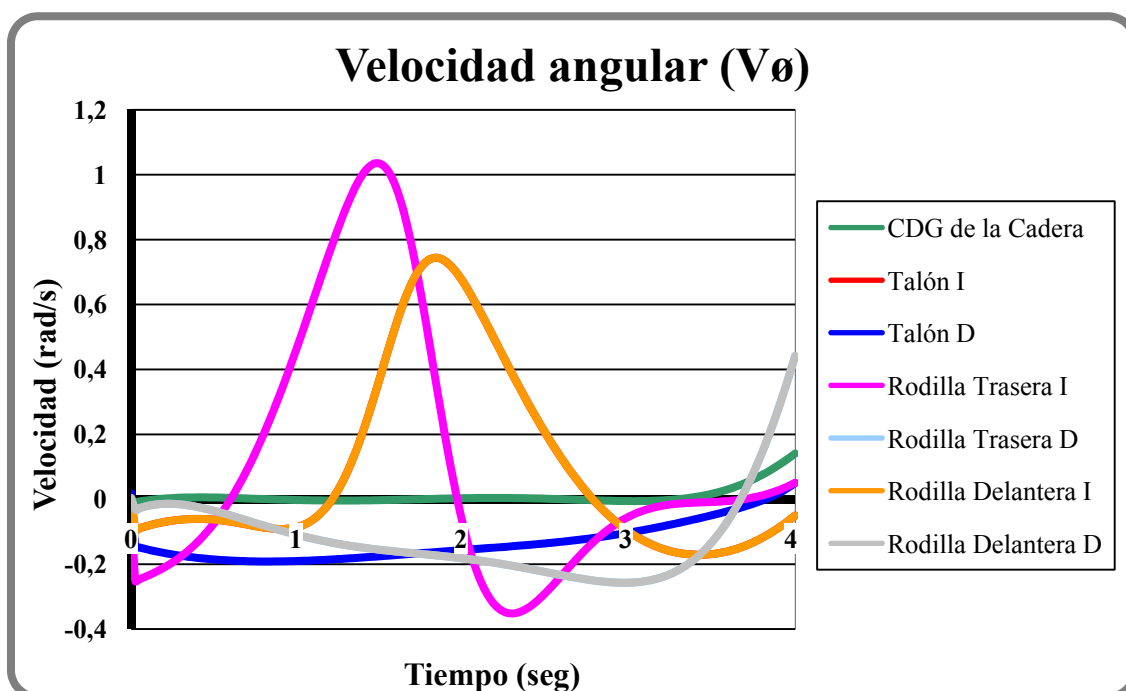


Figura 4.27: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 3).

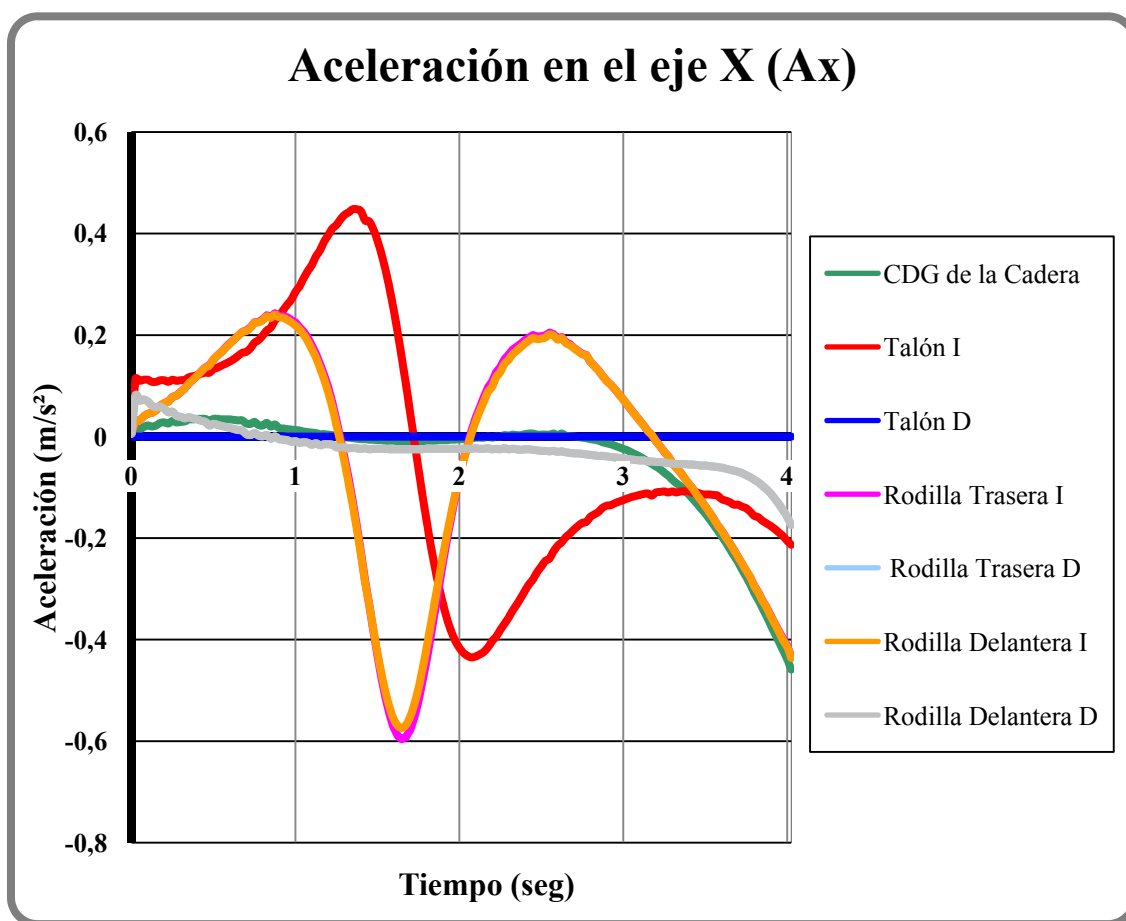
Si se observa la figura a simple vista destaca que la Rodilla Trasera I es la que mayor velocidad angular alcanza cuando está realizando el primer paso, alcanzando valores de 1,035 rad/s en 1,5 segundos. Cuando el pie izquierdo ha completado la mitad del paso la velocidad angular de la Rodilla Trasera I desciende su valor de manera considerable alcanzando valores negativos.

La evolución de la velocidad angular de la Rodilla Delantera I sigue la misma evolución que la del Talón I. El máximo valor se alcanza cuando el pie está en el punto más alto, ese valor es de 0,74 rad/s en 1,85 segundos. Ocurre lo mismo con la evolución de la Rodilla Delantera D, que sigue la misma evolución que la Rodilla Trasera D, por ello no se puede apreciar con claridad en la figura 4.27.

La evolución de la velocidad angular del CDG de la Cadera tiene valores próximos a cero, excepto cuando está aproximándose el final del tiempo de estudio.

Por último destaca que aunque el pie derecho este anclado al suelo y no se mueva en este caso bajo ninguna circunstancia (siendo además los valores de la posición y de las velocidades cero en cualquier instante de tiempo en el Talón D), la velocidad angular del Talón D no es cero prácticamente hasta el final, porque el Talón D está conectado a la Tibia que gira cuando el robot Pasibot está realizando el paso.

- **Aceleración**



**Figura 4.28: Evolución de la aceleración en el eje X en función del tiempo (Caso 3).**

La figura 4.28 refleja la aceleración proyectada en el eje X en función del tiempo de los diferentes puntos de estudio que se reflejan en la leyenda de la figura.

La figura 4.28 es una consecuencia de la figura 4.24, que indica la velocidad  $V_x$  de las partes que se estudian en el robot Pasibot. Todas las aceleraciones en el eje X tienen valores próximos a cero en el instante inicial.

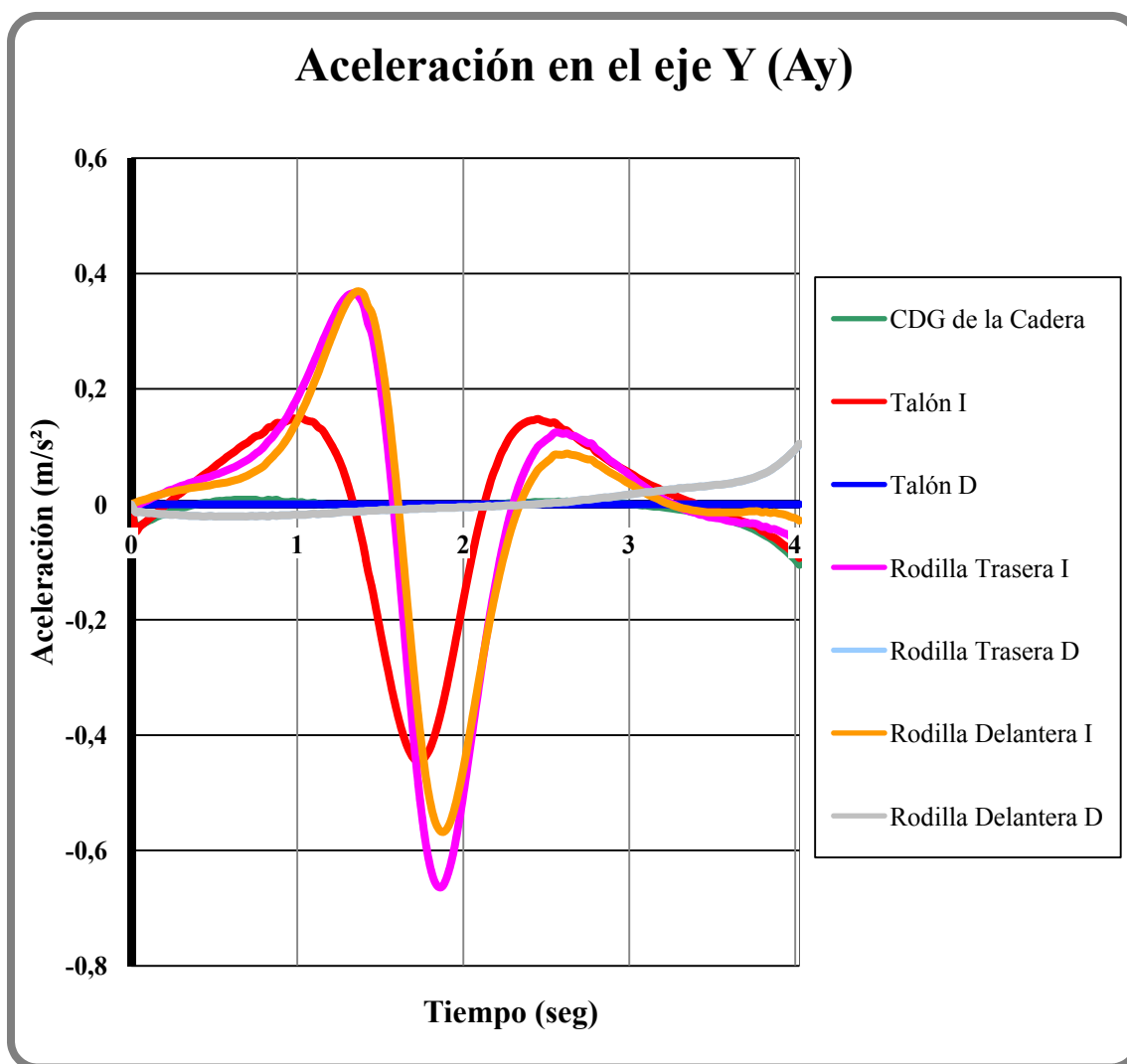
Después, por la realización del paso que realiza la pierna izquierda, la aceleración del Talón I sufre un incremento considerable cuando el robot Pasibot está levantando el pie, alcanzando una aceleración máxima de  $0,448 \text{ m/s}^2$  cuando transcurren  $1,378$  segundos.

Cuando alcanza la aceleración máxima en el eje X y tiene suficiente inercia para completar el paso, se produce una deceleración importante que llega a tomar un valor de  $-0.433 \text{ m/s}^2$  cuando han transcurrido 2,1 segundos.

Destaca también la evolución que sufre tanto la Rodilla Delantera I como la Rodilla Trasera I, que nada más comenzar el paso sufre un incremento considerable producido por la fuerza del Motor que hace levantar toda la pierna izquierda. Por ello se acelera tanto el Talón I como las dos rodillas de la pierna izquierda. Los valores máximos que alcanza en positivo son de  $0,235 \text{ m/s}^2$  cuando el marcador del tiempo marca 0,9 segundos. Nada más alcanzar este máximo, se produce una deceleración importante, alcanzando la máxima deceleración del robot Pasibot con un valor de  $-0,59 \text{ m/s}^2$  cuando han transcurrido 1,65 segundos. Nada más alcanzar este mínimo se vuelve a producir otro incremento para luego volver a bajar. Esto se debe al movimiento que realizan las rodillas cuando el robot Pasibot ejecuta el paso con la pierna izquierda.

Se observa que, como ha pasado en todas las figuras anteriores excepto en la velocidad angular, la aceleración en el eje X del Talón D de la pierna derecha es nula porque está anclada.

Aunque no pueda verse, la aceleración en el eje de la Rodilla Trasera D es la misma que la de la Rodilla Delantera D.



**Figura 4.29: Evolución de la aceleración en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).**

La figura 4.29 representa la evolución de la aceleración en el eje Y de las partes del robot Pasibot que se están estudiando en función del tiempo.

En primer lugar se puede destacar que la aceleración en el eje Y del Talón D es de 0 m/s<sup>2</sup> en todo instante de tiempo porque el pie derecho está anclado.

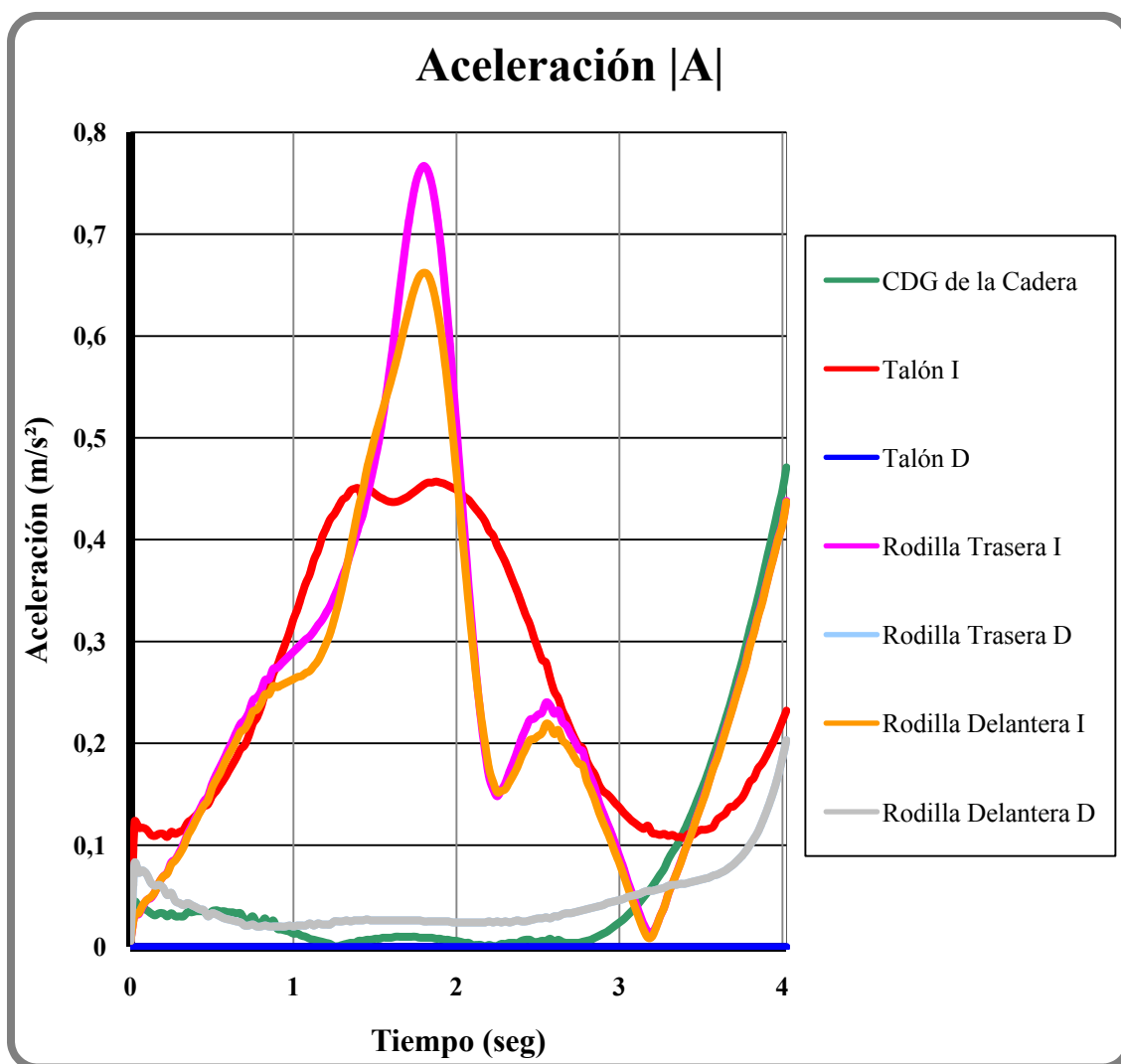
La aceleración en el eje Y del CDG de la Cadera tiene valores próximos a cero en todo el transcurso de tiempo, excepto en el inicio que se mueve ligeramente el CDG de la Cadera y en el final que también el CDG de la Cadera se mueve, tiene velocidad y por ello aceleración que en este caso es negativa (esto no se puede apreciar en la figura pero con los datos se puede observar).



La aceleración en el eje vertical de la Rodilla Delantera D sufre la misma evolución en el tiempo que la de la Rodilla Trasera D, por ello no se puede apreciar con claridad en la figura 4.29. Además, sufren la misma evolución porque las dos rodillas de la pierna derecha están unidas por un eslabón denominado Rodilla D, y permanece en todo instante de tiempo en paralelo con el Pie D. Estas aceleraciones tienen valores próximos a  $0 \text{ m/s}^2$ , excepto al final que se incrementa.

Se puede destacar también la evolución de la Rodilla Trasera I y la Rodilla Delantera I, que son semejantes en el tiempo porque ocurre lo mismo, las rodillas de la pierna izquierda están unidas por un eslabón denominado Rodilla I que está en paralelo en todo instante con el Pie I. La aceleración máxima que alcanzan las rodillas de la pierna izquierda en positivo son  $0,369 \text{ m/s}^2$  cuando el tiempo marca 1,375 segundos. Poco después, se produce una gran deceleración que alcanza un valor de  $-0,662 \text{ m/s}^2$  cuando han transcurrido 1,85 segundos. Correspondiendo al movimiento del robot Pasibot en el que las rodillas de la pierna izquierda están en su posición más alta.

Si se observa la evolución del Talón I, sigue la misma que la de las rodillas de la pierna izquierda pero con valores más pequeños, alcanzando su máxima deceleración cuando el Talón I está en la posición más alta.



**Figura 4.30: Evolución del módulo de la aceleración en función del tiempo (Caso 3).**

La figura 4.30 refleja la evolución en función del tiempo del módulo de la aceleración de las partes del robot Pasibot que se están estudiando.

Se puede destacar, que el módulo de la aceleración en el Talón D es cero en todo instante de tiempo porque el pie derecho está anclado al suelo y no sufre ningún movimiento.

También destaca que la aceleración del CDG de la Cadera tiene un valor pequeño al principio del paso, luego se aproxima a cero, para que cuando el robot Pasibot este terminando el paso, se produce una aceleración considerable que alcanza valores próximos a  $0,45 \text{ m/s}^2$ .

Aunque no se pueda observar, la aceleración de la Rodilla Delantera D es la misma que la de la Rodilla Trasera D porque sufren las mismas variaciones de la posición y tienen el mismo incremento de la velocidad.

El módulo de la aceleración que sufre la Rodilla Trasera I y la Rodilla Delantera I es la que alcanza los máximos valores, porque son las que más se mueven en cuanto a la posición inicial y las que mayores velocidades alcanzan como se puede observar en las figuras anteriores. Los valores máximos que alcanza en este caso son cuando el pie izquierdo se encuentra en el punto más alto del paso que está realizando. El valor máximo que alcanza es  $0,767 \text{ m/s}^2$  cuando el marcador de tiempo señala 1,8 segundos que pertenece a la Rodilla Trasera I.

El módulo de la aceleración del Talón I no alcanza valores tan altos de la aceleración como los de las rodillas de la pierna izquierda porque su aceleración es menor (como se puede ver en las figuras 4.28 y 4.29).

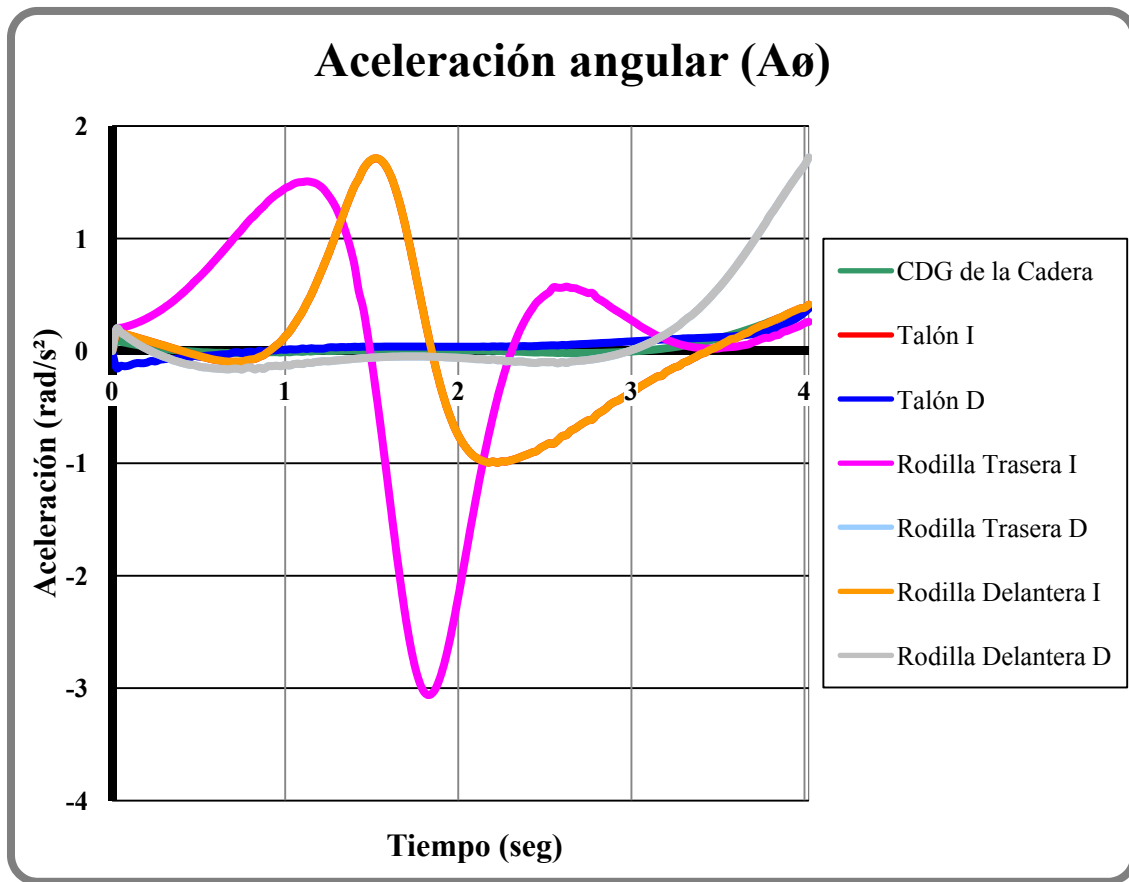


Figura 4.31: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 3).

La figura 4.31 representa la evolución de la aceleración angular en función del tiempo de las diferentes partes del robot Pasibot que se están estudiando y que quedan reflejadas en la leyenda.

Se puede destacar que la aceleración angular del Talón D y la del CDG de la Cadera tienen valores próximos a cero, aunque la velocidad angular no sea cero como se pudo comprobar en la figura 4.27.

También destacan la aceleración angular que sufre la Rodilla Delantera D y la Rodilla Trasera D (ambas de la pierna derecha) que tienen valores que se aproximan a cero hasta que han pasado 3 segundos, donde la aceleración angular aumenta de manera considerable y sigue aumentando cuando se ha acabado el tiempo de estudio como se puede observar en la figura.

La evolución de la aceleración angular en función del tiempo del Talón I es la misma que la de la Rodilla Delantera I, por ello no se puede apreciar. Al comenzar el robot Pasibot a ejecutar su paso, la aceleración angular de ambas decrece ligeramente. Cuando el tiempo se aproxima a un segundo, la Rodilla Delantera I sufre un incremento considerable de la aceleración angular y cuando el tiempo marca aproximadamente 1,5 segundos se produce una deceleración, alcanzando valores negativos para luego aproximarse a cero.

Si se observa la evolución de la Rodilla Trasera I, se ve que nada más empezar sufre un incremento de la aceleración angular y, cuando apenas sobrepasa un segundo de tiempo, se produce una gran deceleración alcanzando el máximo valor de aceleración angular negativa de  $-3,06 \text{ rad/s}^2$  cuando apenas han transcurrido 1,825 segundos, para luego sufrir un incremento de la aceleración que finalmente se aproxima a cero cuando el robot Pasibot completa el paso.

#### 4º. Caso 4: Robot Pasibot en movimiento con diferentes dimensiones.

Por último se analiza un estudio cinemático del robot Pasibot realizando un movimiento de 4 pasos. En este caso las dimensiones del robot Pasibot son distintas para que el programa WM 2D no diera problemas a la hora de realizar la simulación. Las nuevas dimensiones se señalan tabla 4.2:

**Tabla 4.2: Dimensiones del robot Pasibot utilizado en este caso.**

Pierna	Denominación	Altura [m]	Anchura [m]
Derecha	Pie	0,400	0,030
Izquierda	Pie	0,400	0,030
Derecha	Tibia	0,900	0,030
Izquierda	Tibia	0,900	0,030
Derecha	Peroné	0,900	0,030
Izquierda	Peroné	0,900	0,030
Derecha	Rodilla	0,100	0,030
Izquierda	Rodilla	0,100	0,030
Derecha	Tendón inferior	0,300	0,030
Izquierda	Tendón inferior	0,300	0,030

Pierna	Denominación	Altura [m]	Anchura [m]
Derecha	Tendón superior	0,300	0,030
Izquierda	Tendón superior	0,300	0,030
Derecha	Fémur	0,450	0,030
Izquierda	Fémur	0,450	0,030
Derecha	Contrafémur	0,450	0,030
Izquierda	Contrafémur	0,450	0,030
Derecha	Estabilizador	0,200	0,030
Izquierda	Estabilizador	0,200	0,030
Derecha	Biela	0,250	0,030
Izquierda	Biela	0,250	0,030
Derecha	Balancín	0,125	0,030
Izquierda	Balancín	0,125	0,030
	Manivela	0,100	0,030

Estas dimensiones son proporcionadas por el grupo MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid.

La diferencia de dimensiones provoca que el robot Pasibot camine sin que el programa Working Model 2D de problemas a la hora de realizar la simulación.

El movimiento que se estudiara será apoyarse en el suelo desde una distancia mínima, y a continuación realizar 4 pasos. La velocidad que se le proporciona al Motor en este caso son de  $-59,296 \text{ }^\circ/\text{s}$  (aproximadamente  $1 \text{ rad/s}$ , el signo negativo se le proporciona para que el robot Pasibot se desplace hacia la derecha). Esta velocidad se ha proporcionado para que el robot Pasibot haga una media de 15 pasos por minuto.

En este cuarto caso se localiza el origen del sistema de referencia en la superficie de la pieza que representa el suelo, lo más próximo posible al Talón I.

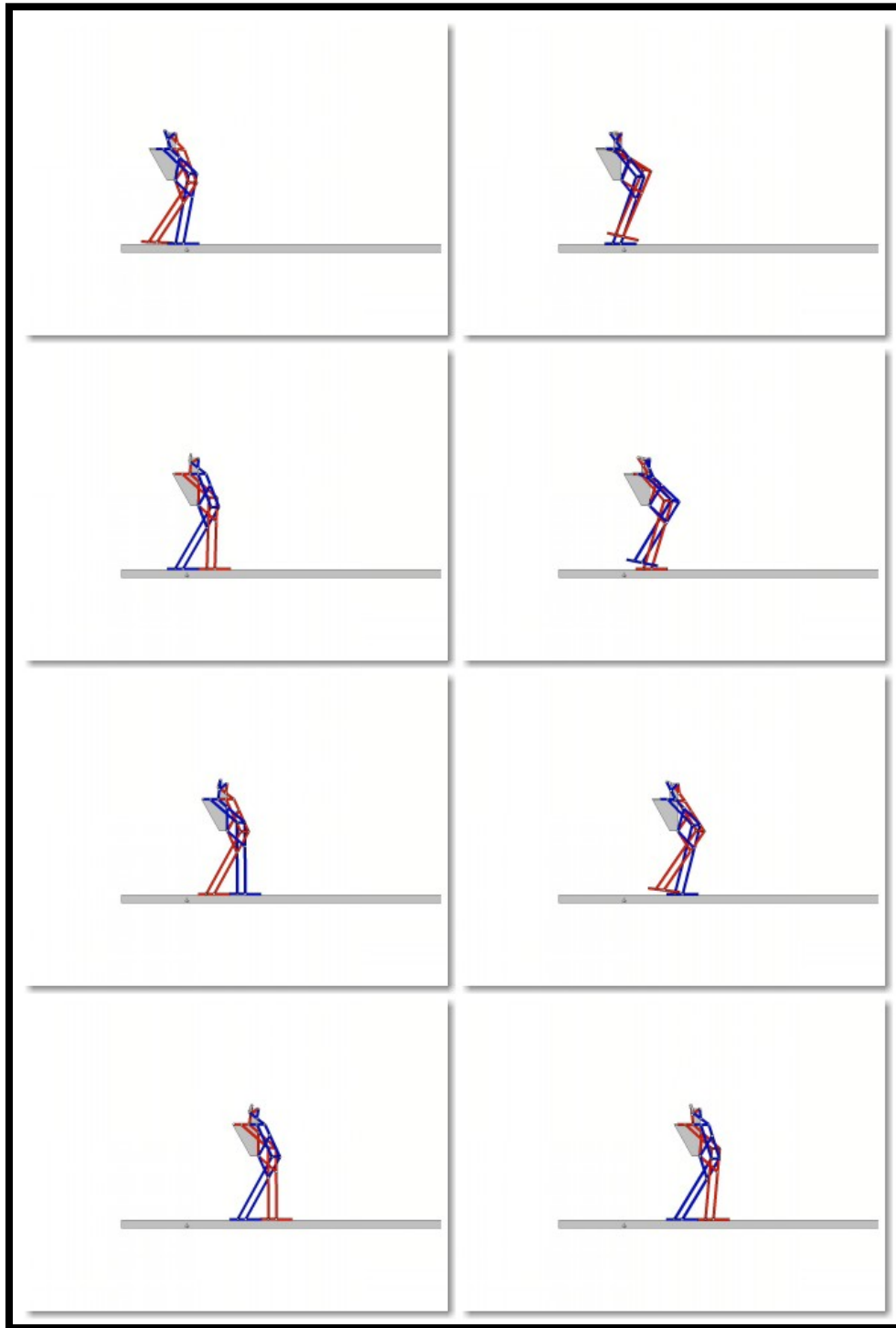
En la página siguiente se indica la tabla 4.3, con las características técnicas de los componentes del robot Pasibot.



Tabla 4. 3: Características técnicas de las piezas del Robot Pasibot del caso 4.

Pieza	Material	Masa [kg]	Fricc. Static.	Fricc. Cinet.	Coef. Elastic.	Charge	Densidad [kg/m <sup>2</sup> ]	Momento [kg . m <sup>2</sup> ]
Suelo	Standard	1	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	1	8.334
Pie	Standard	0,012	0,300	0,300	0,500	$1.10^{-4}$	1	$1,609 \cdot 10^{-4}$
Tibia	Steel	0,216	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	0,015
Peroné	Steel	0,216	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	0,015
Rodilla	Steel	0,024	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$1,180 \cdot 10^{-5}$
Fémur	Steel	0,108	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	0,002
Contrafémur	Steel	0,108	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	0,002
T. Inferior	Steel	0,072	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$5,454 \cdot 10^{-4}$
T Superior	Steel	0,072	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$5,454 \cdot 10^{-4}$
Estabilizad.	Steel	0,048	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$1,636 \cdot 10^{-4}$
Biela	Steel	0,060	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$3,170 \cdot 10^{-4}$
Balancín	Steel	0,030	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$4,131 \cdot 10^{-4}$
Manivela	Steel	0,024	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	$2,180 \cdot 10^{-5}$
Cadera	Steel	0,858	0,400	0,300	0,950	$1.10^{-4}$	8	0,023

En este caso no se comentaran los valores obtenidos en las figuras ya que las dimensiones no son las del modelo real. El objetivo de este estudio es ver la evolución que sufren las partes de más interés, desde el punto de vista cinemático.



**Figura 4.32: Movimiento que realiza el robot Pasibot en el caso 4.**

- **Posición**

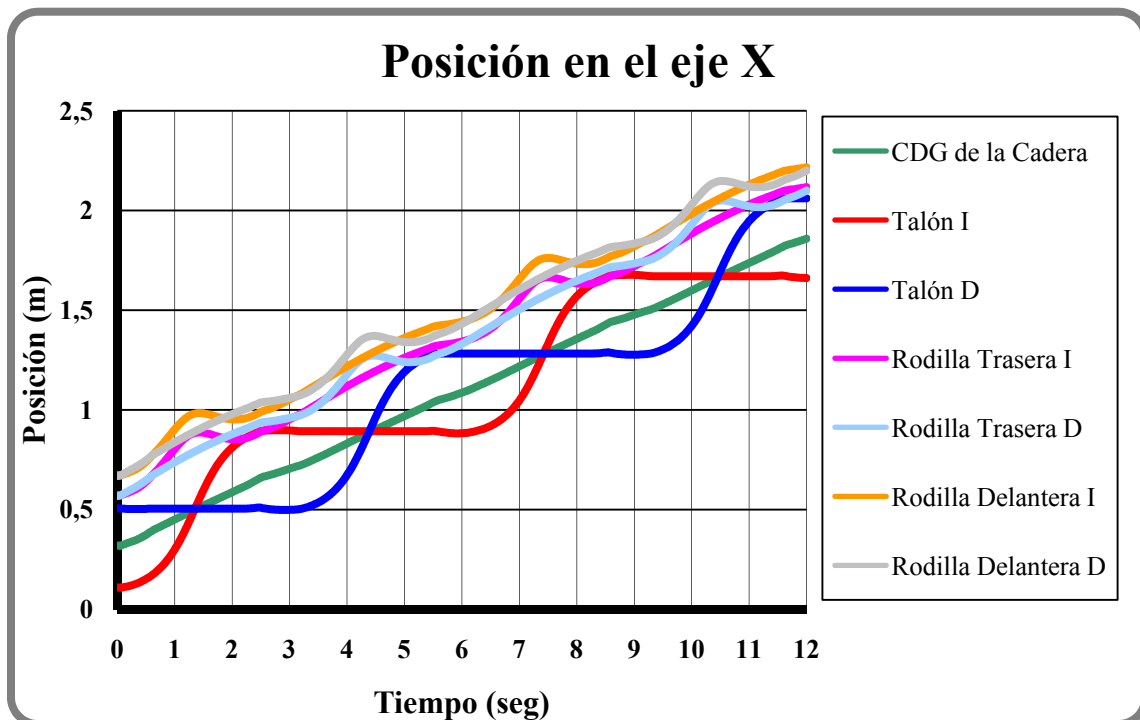


Figura 4.33: Evolución de la posición en el eje X en función del tiempo (Caso 4).

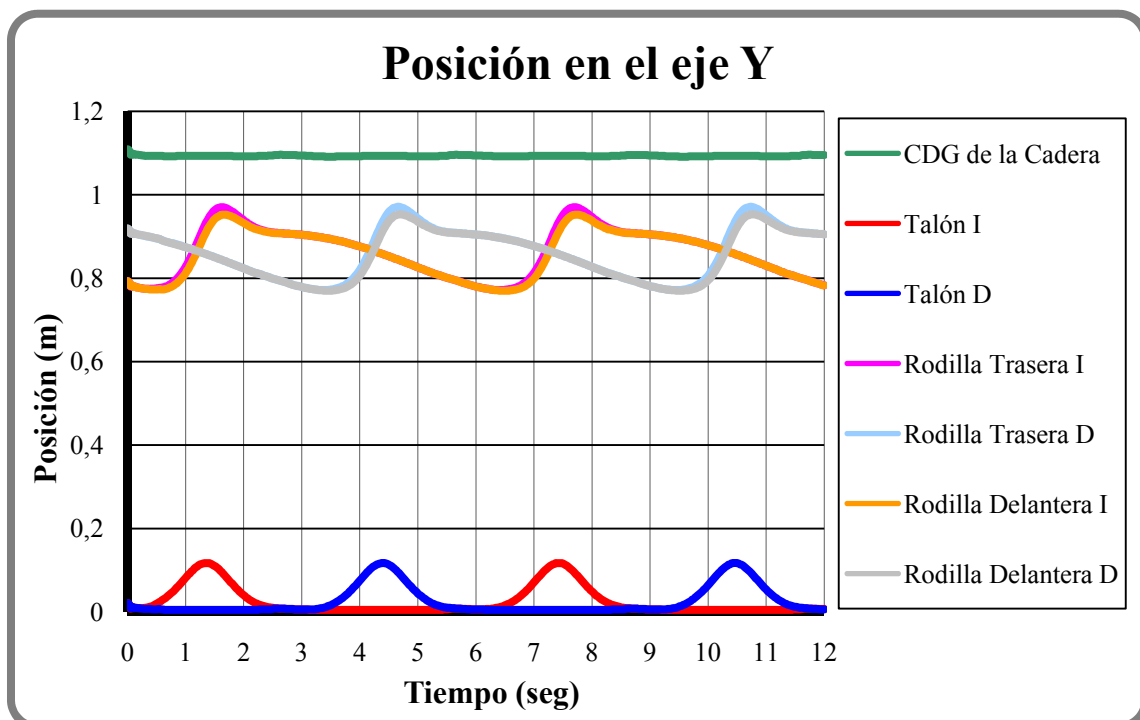


Figura 4.34: Evolución de la posición en el eje Y en función del tiempo (Caso 4).

La figura 4.33 representa la evolución de la posición en el eje X de los puntos del robot Pasibot que más interés pueden presentar. La figura 4.34 refleja la evolución de la posición en el eje Y.

Si se observa la figura 4.33 se pueden destacar varios puntos:

- La evolución del Talón I y del Talón D son semejantes, excepto que cuando uno de ellos se incrementa, el otro permanece constante. Esto se debe a que cuando un pie completa un paso, el otro pie permanece fijo en el suelo.
- El incremento de la posición en el eje X del Centro de Gravedad de la Cadera tiene una pendiente lineal, aumentando de forma constante cuando el robot Pasibot camina.
- La evolución de la Rodilla Delantera I y la Rodilla Trasera I es igual, permaneciendo paralelas en todo instante a un valor fijo una de otra.
- Por último la evolución que sufre Rodilla Delantera D y la Rodilla Trasera D son semejantes y con una diferencia entre ellas que permanece constante. Además la Rodilla Delantera D está más desplazada en el eje X que la Rodilla Trasera D como es lógico.

En cambio la figura 4.34 presenta diferencias notables, estas diferencias son las siguientes:

- El CDG de la Cadera no sufre apenas variación de la posición en el eje Y cuando el robot Pasibot camina. Excepto desde que la pierna izquierda, Talón I, completa el paso y entra en contacto con el suelo hasta que la pierna derecha se levanta. En este intervalo de tiempo la posición del CDG de la Cadera varía ligeramente.
- La evolución del Talón I y del Talón D es semejante. Ambos sufren un incremento cuando la pierna correspondiente realiza el paso, descendiendo a valores próximos a cero cuando la pierna completa el paso.

- Tampoco se modifica la posición en el eje Y del Talón I y del Talón D cuando la otra pierna es la que realiza el paso.
- La evolución de la Rodilla Trasera D es igual que la de la Rodilla Delantera D, excepto cuando la pierna derecha está en el punto más alto de la posición en el eje Y, que se produce una ligera variación entre ambas.
- La Rodilla Delantera I y la Rodilla Trasera I tienen la misma evolución que las rodillas de la pierna derecha. Alcanzando los mismos máximos y mínimos en los dos puntos.

Por último como conclusión a ambas figuras, destaca el tiempo que tarda el robot Pasibot en ejecutar un paso. En este caso el tiempo es aproximadamente entre 3 y 3,5 segundos. También se puede destacar el movimiento que sufre el CDG de la Cadera, que en el eje X avanza de manera constante y en el eje Y apenas sufre variación.

- Velocidad

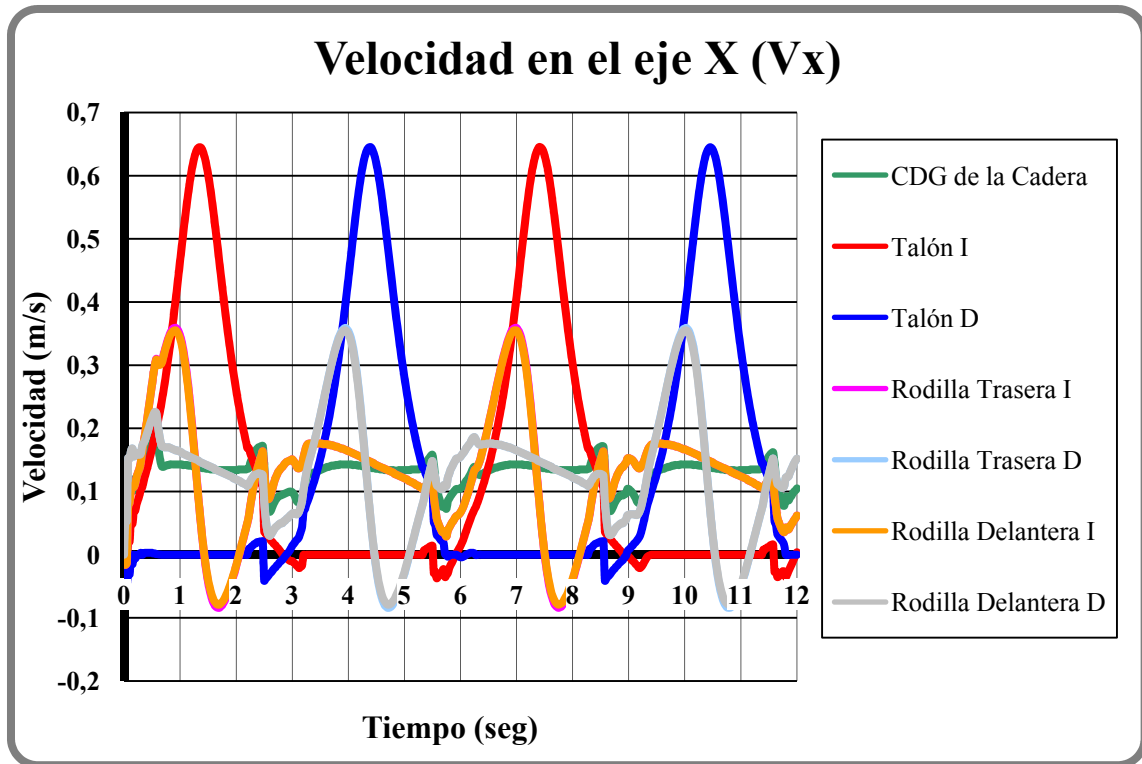


Figura 4.35: Evolución de la velocidad respecto al eje X en función del tiempo (Caso 4).

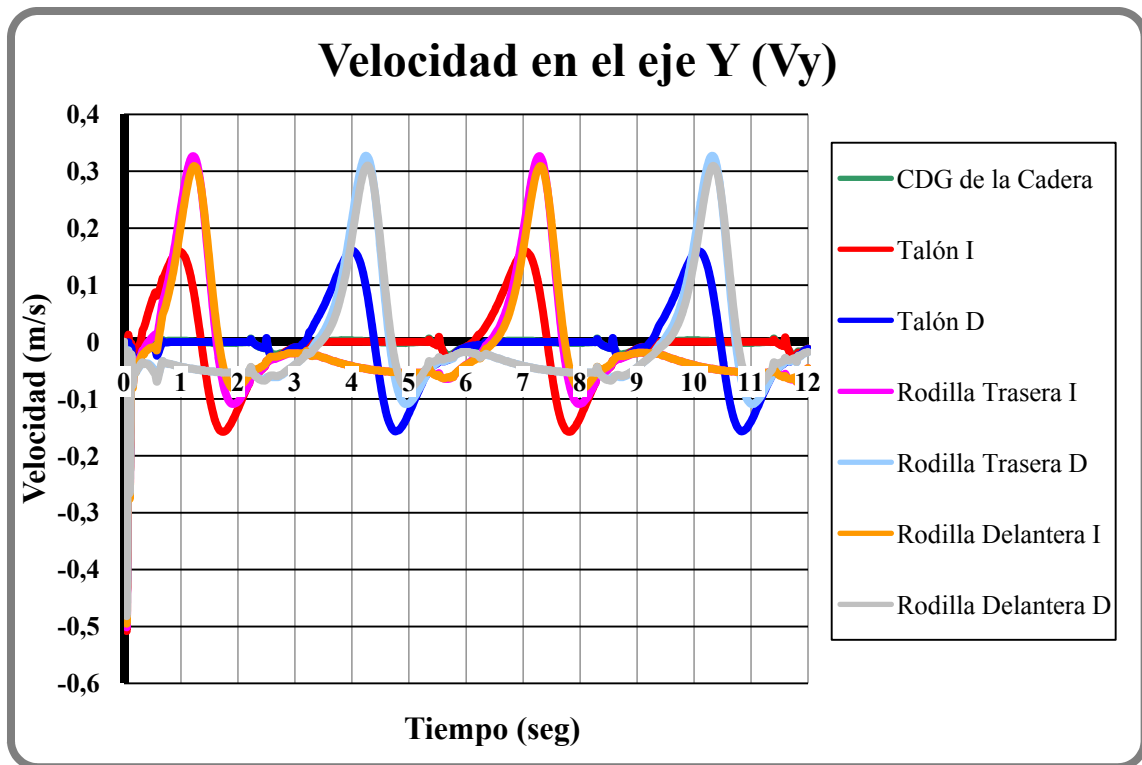


Figura 4.36: Evolución de la velocidad respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 4).

Ambas figuras reflejan la evolución de la velocidad. En el caso de la figura 4.35, la evolución de la velocidad en el eje X. Mientras que la figura 4.36 refleja la variación de la velocidad en el eje Y. Todo ello mientras el robot Pasibot ejecuta 4 pasos y de los puntos que más resultan de interés.

En la figura 4.35 resaltan varias observaciones que se deben reflejar:

- La velocidad que alcanza el robot Pasibot al caminar es máxima en los talones, tanto en el Talón I como en el Talón D. Los máximos valores de la velocidad se alcanzan en el instante en el que el robot Pasibot eleva el talón correspondiente a la máxima altura (máximo valor de la posición en el eje Y, figura 4.34). Debido a que ambos talones son los que más se desplazan y por ello necesitan una mayor velocidad. Por otro lado mientras un talón está alcanzando su máxima velocidad, el otro talón tiene una velocidad de valores cercanos a cero metros por segundo. Por último, antes de ejecutar un paso, el talón correspondiente toma una velocidad negativa, para luego con una pendiente positiva, alcanzar ese máximo comentado anteriormente.
- La velocidad que alcanza la Rodilla Trasera D es la misma que la Rodilla Delantera D en todo instante de tiempo. También ocurre con la evolución de la velocidad de la Rodilla Trasera I que es la misma que la de la Rodilla Delantera I. Esto ocurre porque la variación de la posición de estos 4 puntos es igual. Alcanzando sus máximos valores, en el caso por ejemplo de la pierna izquierda, cuando el pie izquierdo se eleva para completar un paso.
- La evolución de la velocidad del Centro de Gravedad de la Cadera no sufre apenas variación cuando el robot Pasibot está completando el paso. Pero si sufre una variación considerable desde que termina por completar un paso hasta que comienza el siguiente, produciéndose unas oscilaciones.

De la figura 4.36 se puede destacar lo siguiente:

- La evolución de la velocidad del Talón I y del Talón D es la misma, alcanzando los mismos valores máximos y mínimos. Ambas alcanzan la velocidad máxima cuando la pierna correspondiente esta en el punto más alto y tienen valores próximos a cero cuando la pierna correspondiente no realiza el paso.
- La velocidad en el eje Y del Centro de Gravedad de la Cadera tiene valores próximos a cero en todo el periodo de tiempo de estudio, excepto cuando una pierna comienza a ejecutar el paso y con ello elevar sus correspondientes velocidades, que se produce un ligero descenso de la velocidad del CDG de la Cadera.
- Por último destacar la velocidad que alcanzan las rodillas del robot Pasibot. Son semejantes la evolución de la Rodilla Trasera D y la Rodilla Delantera D, ocurriendo lo mismo que las rodillas correspondientes a la pierna izquierda.



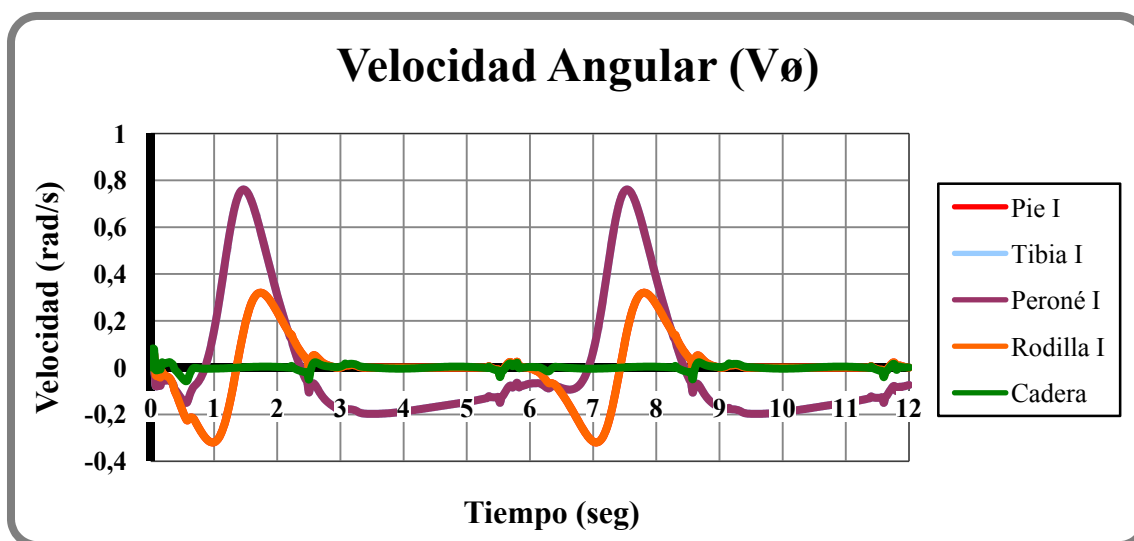


Figura 4.37: Evolución de la velocidad angular en función del tiempo (Caso 4).

Las piezas del robot Pasibot de esta figura pertenecen a la pierna izquierda (excepto la Cadera), debido a que las evoluciones de las mismas piezas de la pierna derecha son semejantes, variando cuando sea la pierna derecha la que realice el paso.

Si se observa la figura, lo que más destaca es que la velocidad angular de la Cadera tiene valores muy próximos a cero (en comparación con el resto de piezas del robot Pasibot que se están estudiando). Solo sufre unos ligeros descensos correspondiendo a los instantes en el que el robot Pasibot va a empezar un paso.

Las piezas del robot Pasibot que mayor velocidad angular alcanzan son el Peroné I y la Tibia I (ambos de la pierna izquierda), que tienen los mismos valores en todo instante de tiempo (por ello no se puede ver en dicha figura la evolución de la Tibia I). Que tengan los mismos valores en cualquier instante de tiempo es debido a que ambas piezas permanecen paralelas en todo instante de tiempo.

Ocurre lo mismo con la Rodilla I y el Pie I, que están paralelas a lo largo de todo el movimiento que realiza el robot Pasibot. Por ello los valores de la velocidad angular que alcanzan ambas piezas son iguales a lo largo de todo el tiempo de estudio.

Desde el punto de vista de los valores, las velocidades angulares positivas son mayores en el Peroné I y la Tibia I. Siendo mayores las velocidades angulares negativas de la Rodilla I y el Pie I.

- **Aceleración**

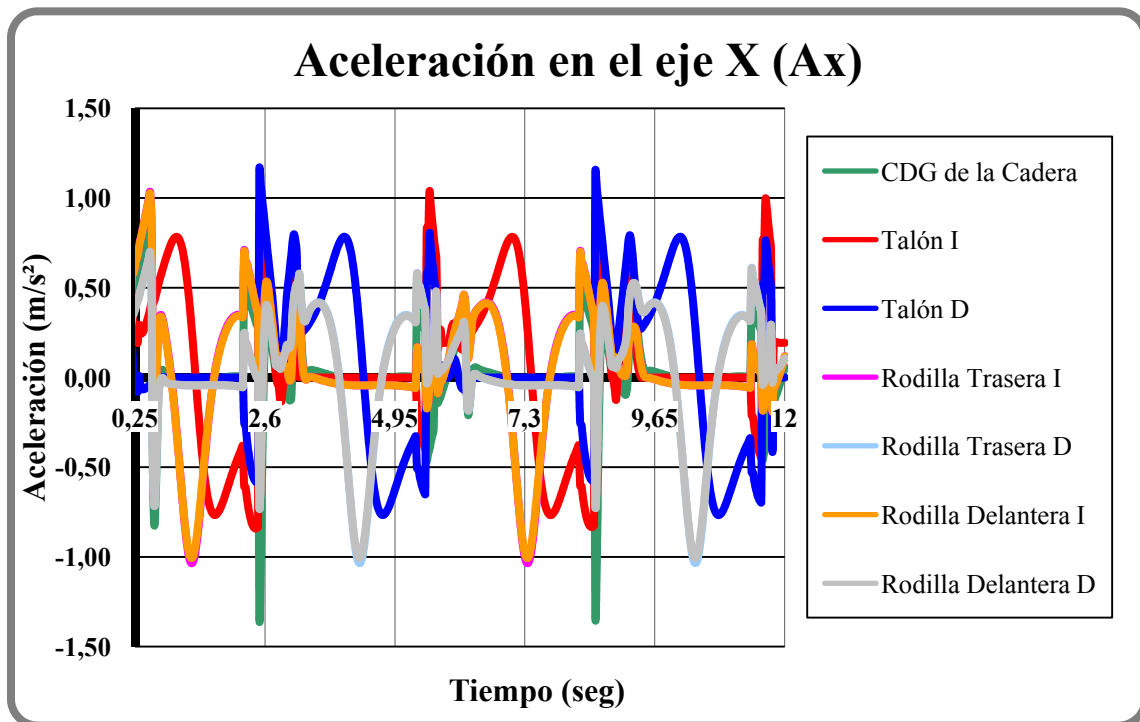


Figura 4.38: Evolución de la aceleración respecto al eje X en función del tiempo (Caso 4).

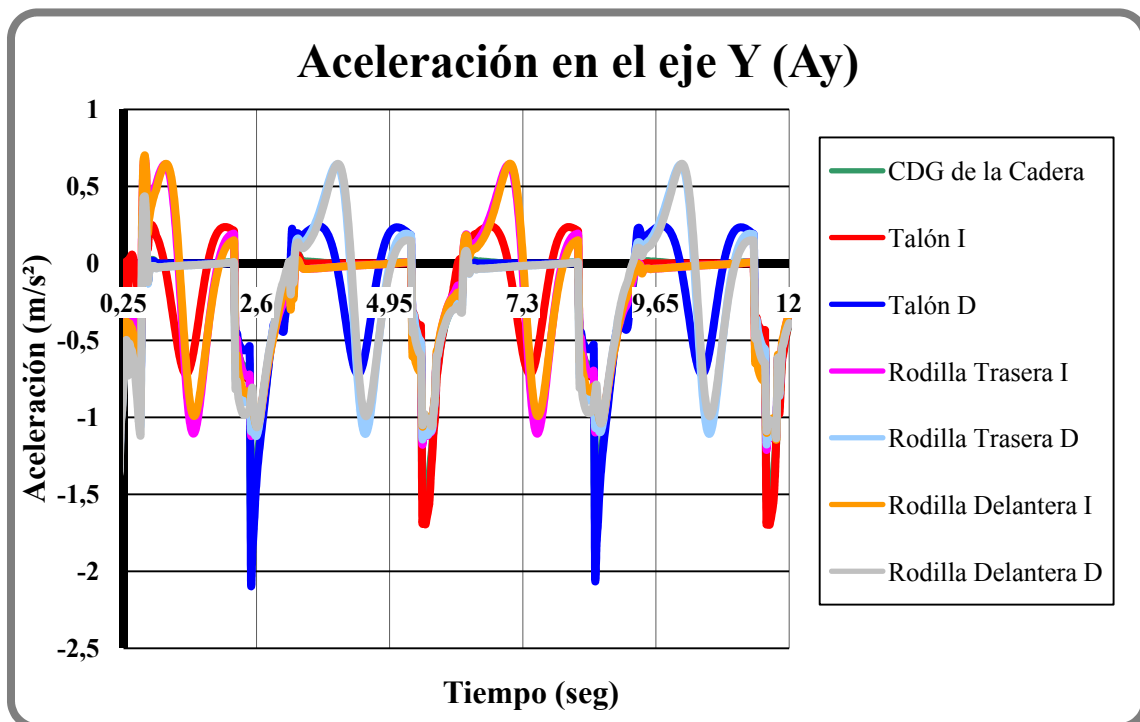


Figura 4.39: Evolución de la aceleración respecto al eje Y en función del tiempo (Caso 4).

La figura 4.38 representa la evolución de la aceleración en el eje X en función del tiempo, de los puntos que se representan en su respectiva leyenda. La figura 4.39 representa la evolución de la aceleración en el eje Y en función del tiempo.

Se debe señalar en primer lugar que se ha modificado el tiempo de estudio. El motivo de ello es, que aunque en la posición inicial del robot Pasibot se ha intentado ajustar lo máximo posible para que los pies estén en contacto con el suelo desde el principio, no se ha logrado conseguir y por ello existe una distancia (milímetros) entre los pies del robot Pasibot y el suelo. Que exista esta mínima distancia provoca que, en el instante inicial, aumenten los valores de la aceleración en comparación con los que alcanza a lo largo de la simulación. Por ello se ha eliminado ese periodo que no interesa a la hora de estudiar este caso.

Estudiando el resto de la evolución de la figura 4.38 destaca lo siguiente:

- Las evoluciones que sufren el Talón I y el Talón D son semejantes, alcanzando los mismos máximos y mínimos. Lo único diferente es que la evolución varía en función de la pierna a la que pertenecen cuando realiza el paso, así si la pierna derecha sube para hacer un paso, la aceleración del Talón D aumenta y si no es la pierna derecha la que realiza el paso, las aceleraciones que sufre el Talón D son próximas a cero. Ocurre lo mismo con el Talón I y la pierna izquierda.
- Las aceleraciones de la Rodilla Trasera D son las mismas que las de la Rodilla Delantera D, ocurriendo lo mismo con las aceleraciones de la Rodilla Trasera I que son las mismas que las de la Rodilla Delantera I. Las cuatro evoluciones son periódicas como se puede observar
- La aceleración del CDG de la Cadera tiene valores próximos a cero excepto dos picos que se pueden observar. Este valor tan alejado de la tendencia se da, en el movimiento del robot Pasibot, cuando está apoyando el pie izquierdo sobre el suelo al completar el paso.

De la figura 4.39, aunque tenga varias cosas en común con la figura 4.38, se puede destacar lo siguiente.

- La aceleración en el eje Y del Talón I y el Talón D son bastante parecidas, excepto los picos que alcanzan las velocidades en negativo, que las del Talón D son mayores que las del Talón I. Los picos que alcanza el Talón D se producen cuando la pierna izquierda se apoya en el suelo al completar el paso. Los picos correspondientes al Talón I se producen cuando el robot Pasibot apoya el pie derecho sobre el suelo al completar el paso.
- La aceleración en el eje Y de la Rodilla Trasera I es semejante a la de la Rodilla Delantera I (excepto al alcanzar los máximos que se produce una ligera diferencia), ocurriendo lo mismo con la Rodilla Trasera D que es semejante a la de la Rodilla Delantera D (excepto en los máximos).
- La aceleración del Centro de la Gravedad de la Cadera no se puede apreciar con claridad en la figura. Eso es debido a que la evolución que sufre tiene los mismos valores que los distintos puntos de estudio del robot Pasibot. Se refleja en detalle en la figura 4.40.

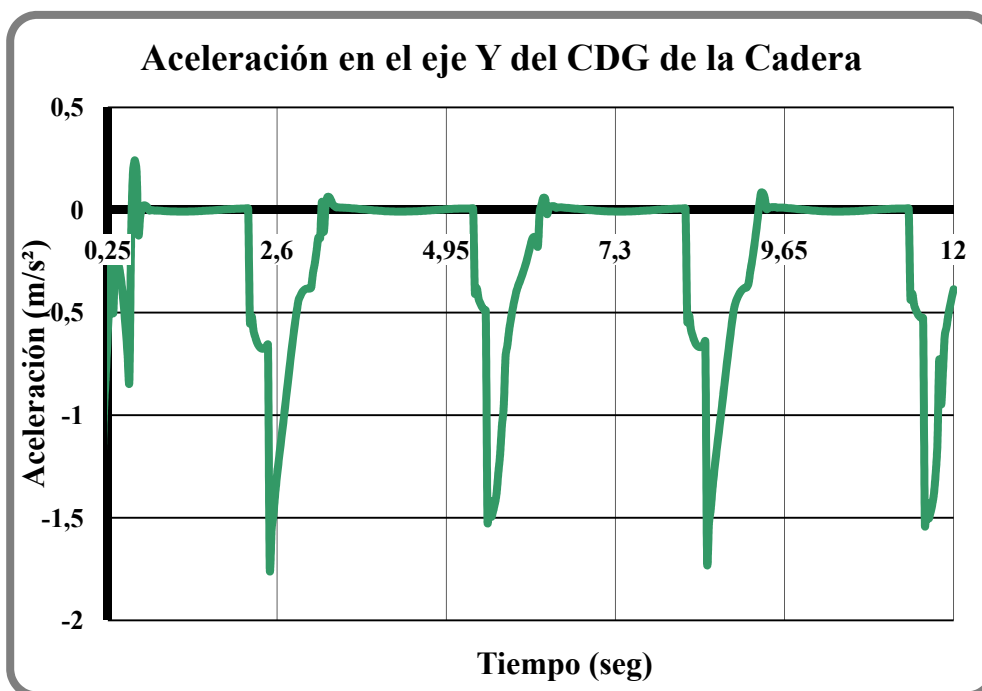
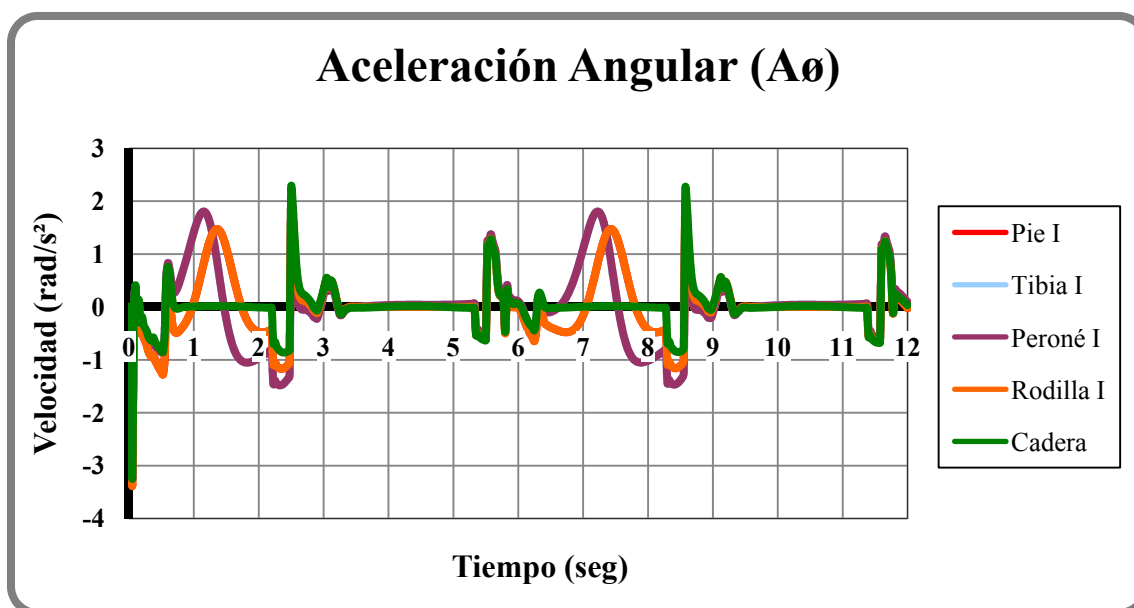


Figura 4.40: Evolución de la aceleración del CDG de la Cadera en el eje Y (Caso 4).



**Figura 4.41: Evolución de la aceleración angular en función del tiempo (Caso 4).**

La figura 4.41 representa la evolución de la aceleración angular en función del tiempo. El tiempo de estudio en esta figura no se ha variado porque, aunque como se puede observar en el instante inicial (en el cual el robot Pasibot cae desde una altura mínima) la aceleración angular que se alcanza es bastante superior a la del resto de la simulación, se puede apreciar con claridad la evolución de la aceleración angular del robot Pasibot.

Una vez comentado esto, se debe destacar que la aceleración angular del Pie I es igual que la Rodilla I (por ello no se puede apreciar bien los valores que alcanza). Esto ocurre porque, además de que ambas tienen misma velocidad angular en todo el transcurso de la simulación, ambas piezas se mantienen en paralelo en cualquier instante de tiempo.

Ocurre lo mismo con la aceleración angular del Peroné I y la Tibia I que son las mismas porque las velocidades angulares son las mismas y ambas permanecen en paralelo en cualquier instante de tiempo.

## **4.2.- Comprobación de los resultados con el modelo analítico.**

Una vez que se han obtenido los datos experimentales mediante Working Model 2D y exportados a Microsoft Excel como se ha visto en el apartado anterior, se requiere obtener una comprobación de dichos resultados mediante un programa matemático denominado Matlab (versión 7.0).

Matlab es la abreviatura de *MATrix LABoratory* (laboratorio de matrices). Se trata de un software matemático muy versátil, que integra matemáticas computacionales y visualización para resolver problemas numéricos basándose en arreglos de matrices y vectores.

Para la realización de este apartado se ha trabajado con un proyecto de la Universidad Carlos III de Madrid creado por Saray López Aláez, del cual se ha obtenido el código de programa necesario para obtener el modelo analítico.

La solución en la que se ha basado esta comprobación es álgebra compleja de ecuaciones vectoriales en el plano.

Se puede partir de vectores bidimensionales (con sus dos componentes rectangulares), pero para ello se tendría que aceptar una serie de hipótesis para que Matlab no produjera resultados inadecuados por motivo de los cuadrantes.

Por ello se ha trabajado con álgebra compleja representándolos en un plano, eligiendo el origen y, ajustando los ejes reales e imaginarios para que coincidan con los ejes X e Y.

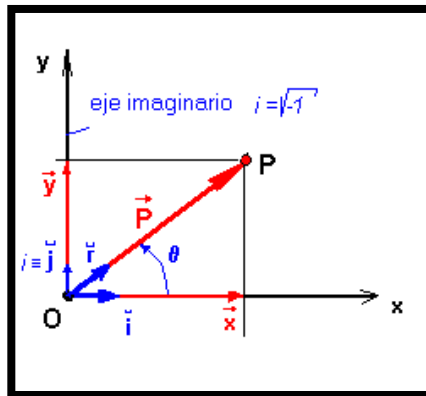


Figura 4.42: Representación de los ejes reales e imaginarios.

En álgebra compleja la localización de un punto en el plano se puede señalar por su vector de posición absoluta o por sus coordenadas real e imaginaria correspondientes.

Pero el motivo de utilizar números complejos en el análisis en el plano es la facilidad con la que se puede pasar a la forma polar.

Si se emplea la ecuación de Euler de la trigonometría, R también se puede escribir en la forma polar compleja como:

$$\left. \begin{aligned} R &= R \cdot \cos \theta + j \cdot R \cdot \sin \theta \\ e^{\pm j\theta} &= \cos \theta \pm j \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \Rightarrow R = R \cdot e^{j\theta} \quad (4.1)$$

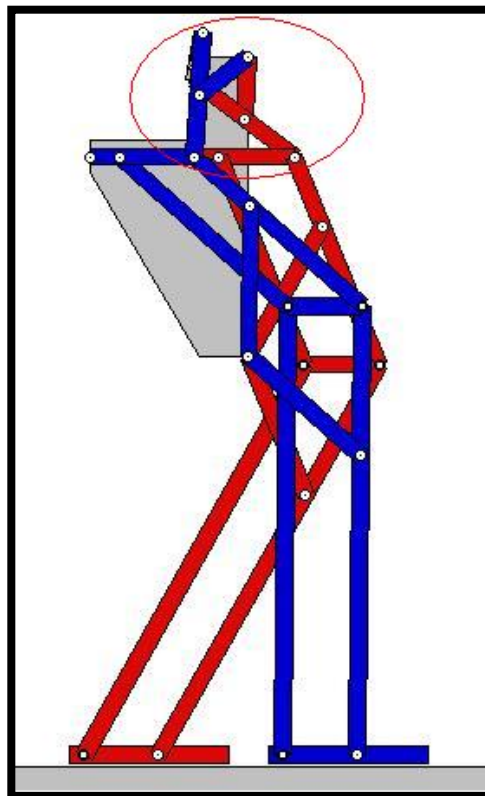
Una vez establecida una introducción de la metodología utilizada para esta comprobación, se debe explicar el mecanismo que se ha utilizado.

Para ello se ha dividido la comprobación mediante dos mecanismos con los que se trabajará a partir de ahora.

#### **4.2.1.- Estudio del primer mecanismo.**

En este primer mecanismo se ha trabajado con la Manivela, la Biela y el Balancín. Estas dos últimas pertenecientes solo a una pierna del robot Pasibot, suficiente para tener una comprobación correcta de los resultados.

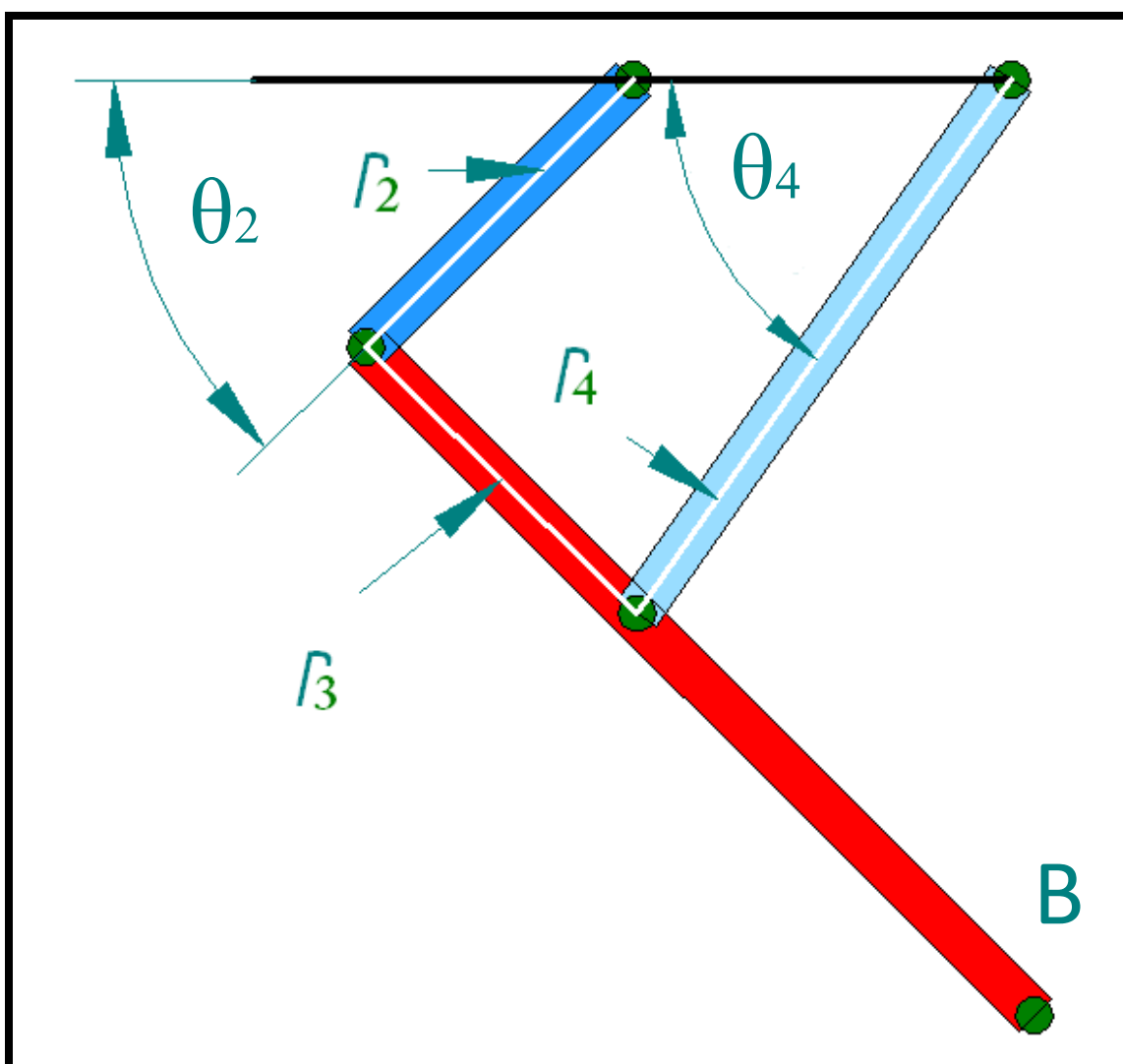
En la figura 4.43 se muestra la zona del robot Pasibot con la que se ha trabajado en el primer mecanismo:



**Figura 4.43: Señalización con un círculo rojo de la zona del robot Pasibot con la que se ha trabajado.**

A continuación se refleja la figura 4.44 que representa la forma simplificada con la que se ha trabajado en Matlab. También se señala el punto (punto B) sobre el que se han obtenido los resultados que se comprueban.





**Figura 4.44: Mecanismo simplificado y señalización del punto B.**

Se debe comentar que el origen del sistema de referencia está lo más próximo posible al Talón I (figura 4.43).

Del punto B (figura 4.44) se obtendrán gráficas con Matlab que indiquen la posición, velocidad y aceleración de dicho punto. Estos datos se comprobarán con el modelo realizado en Working Model 2D, en concreto con el caso 3 (ya que en el caso 4 las dimensiones son distintas), que corresponde con el punto de unión número 7 (figura 3.28).

○ Posición del punto B.

En primer lugar se debe comentar que en Matlab, los dos puntos superiores (*a* y *b*) se han posicionado como fijos, después se ha cargado con un fichero en Microsoft Excel la posición de dichos puntos en cada instante de tiempo, obtenidos mediante la exportación de datos de Working Model 2D. Dichos puntos son *a* y *b* (figura 4.45).

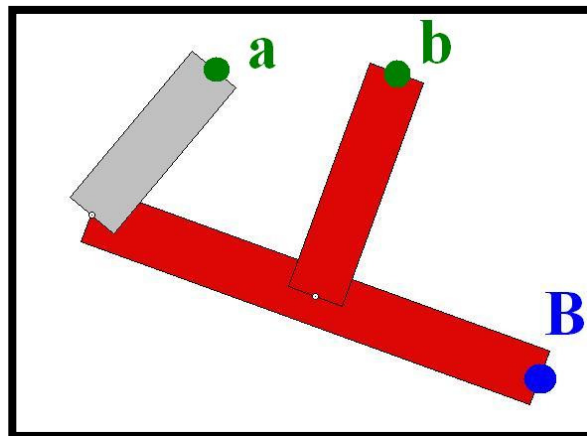


Figura 4.45: Señalización de los puntos a y b.

Con la explicación de estos puntos se presentan a continuación las formulas utilizadas:

$$\left. \begin{aligned} X_B &= r_2 \cdot \cos \theta_2 + r_B \cdot \cos \theta_3 \\ Y_B &= r_2 \cdot \sin \theta_2 + r_B \cdot \sin \theta_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Posiciones del punto B} \quad (4.2)$$

En concreto las formulas escritas en Matlab 7.0 son:

$$\left. \begin{aligned} XB(i) &= xB(i) + xa(i) \\ YB(i) &= yB(i) + ya(i) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Posiciones del punto B} \quad (4.3)$$

Donde *xa* e *ya* son las posiciones en el eje X e Y respectivamente del punto *a* obtenidos con WM 2D. Siendo *xB* e *yB* la posición del punto B que se obtienen siendo los puntos *a* y *b* fijos.

Finalmente los puntos  $XB$  y  $YB$  son la posición del punto B en cualquier instante de tiempo.

El comando  $(i)$  indica que señale la posición del punto B en este caso en cada incremento de tiempo.

Se debe comentar que el periodo de tiempo sobre el que se ha realizado esta comprobación son cuatro segundos, tiempo suficiente para que el robot Pasibot realice el paso con una velocidad del Motor de  $59,296^\circ/\text{s}$  (aproximadamente  $1 \text{ rad/s}$ ).

○ **Posición del punto B en el eje X con Matlab 7.0.**

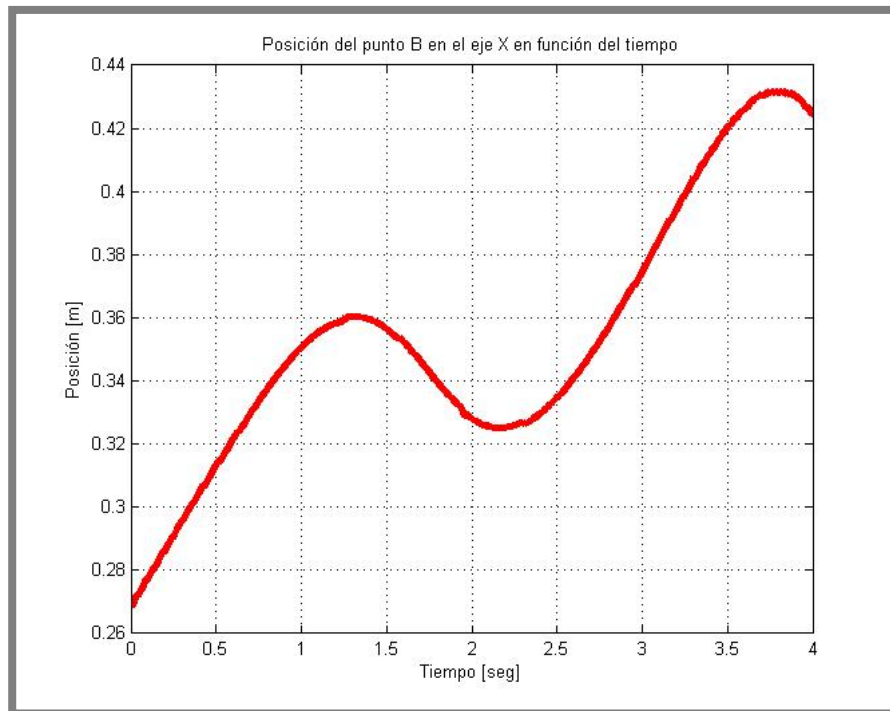


Figura 4.46: Posición del punto B en el eje X con Matlab 7.0.

○ **Posición del punto B en el eje X con Working Model 2D.**

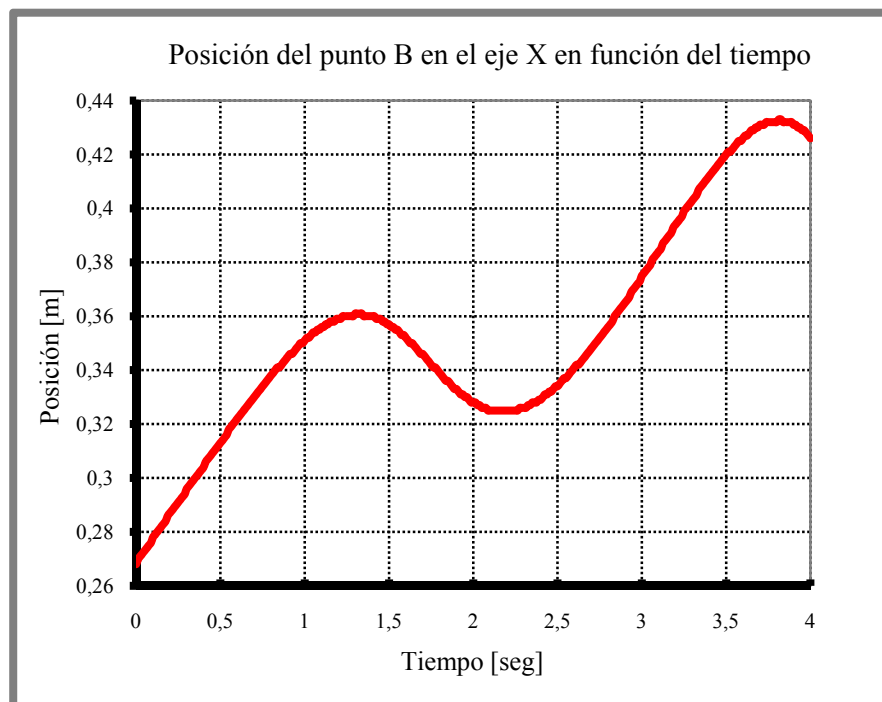


Figura 4.47: Posición del punto B en el eje X con Working Model 2D.

En las figuras 4.46 y 4.47 se muestra la posición del punto B en el eje X obtenidas en Matlab 7.0 y Working Model 2D respectivamente. El tiempo de estudio son los cuatro segundos en los cuales el robot Pasibot realiza un paso.

Si se observan ambas figuras se ve que la evolución de los valores es semejante, aumentando y disminuyendo en los mismos intervalos de tiempo.

En el instante inicial (tiempo de cero segundos) el valor de la posición en el eje X obtenidos en ambos programas tiene el mismo valor, que es aproximadamente 0,27 metros.

Con una tendencia positiva, el valor de la posición en ambas figuras aumenta hasta alcanzar un primer máximo. Tanto en Matlab como en WM 2D el valor de esa posición máxima es de 0,36 m. Ambas en un tiempo de 1,3 segundos aproximadamente.

Después con una tendencia negativa alcanzan un mínimo. Con Matlab el valor es 0,325 metros aproximadamente y con WM 2D ese valor es 0,325 metros también. Ambas en un tiempo de 2,15 segundos.

Finalmente con una pendiente positiva, las dos figuras alcanzan un segundo máximo. Matlab y WM 2D con un valor de 0,43 metros.

Al final existe un descenso de la posición del punto B en el eje X con ambos programas.

La ligera diferencia de valores que alcanzan los dos programas, que en estas figuras son inapreciables, se debe al número de decimales con los que trabaja, a más decimales más exacto el resultado.

○ **Posición del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.**

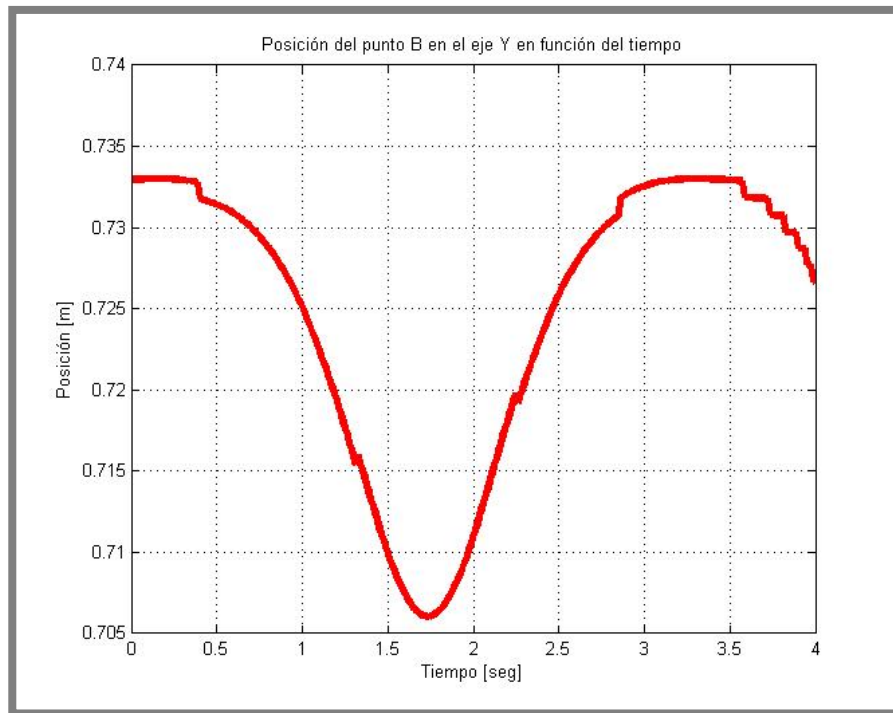


Figura 4.48: Posición del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.

○ **Posición del punto B en el eje X con Working Model 2D.**

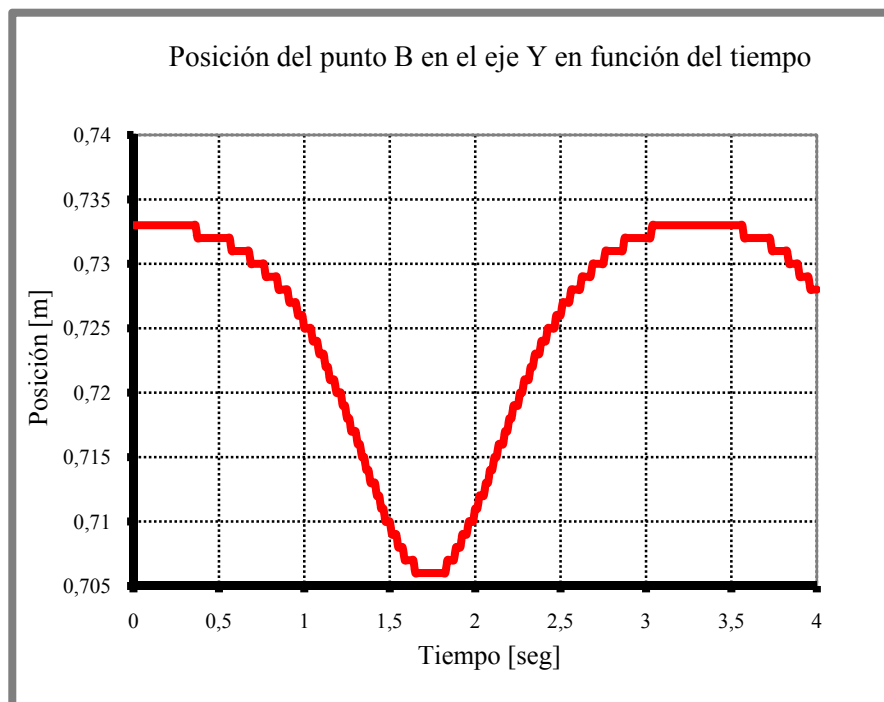


Figura 4.49: Posición del punto B en el eje Y con Working Model 2D.

Las figuras 4.48 y 4.49 indican la posición del punto B en el eje Y obtenidas en Matlab 7.0 y Working Model 2D respectivamente. El tiempo de estudio son los cuatro segundos en los cuales el robot Pasibot realiza un paso.

El valor inicial de la posición del punto B en Matlab es de 0,7325 m aproximadamente y con Working Model 2D también es próximo a 0,7325 m aproximadamente, y durante un corto intervalo de tiempo esa posición permanece constante.

Después las dos figuras tienen una pendiente negativa, alcanzando el único mínimo de la posición en el eje Y. Matlab con un valor ligeramente por encima de 0,705 m y WM 2D exactamente lo mismo. Ambas en un tiempo aproximado de 1,75 segundos.

Tras alcanzar el mínimo la pendiente es positiva, aproximándose ambas figuras a valores de 0,7325 m.

Al final, el descenso de las posiciones con Matlab es notablemente superior al de Working Model 2D.

La ligera diferencia de valores que alcanzan los dos programas se debe al paso de integración.

### ○ Velocidad del punto B.

Respecto a la velocidad del punto B se debe aclarar que en Matlab, los dos puntos superiores ( $a$  y  $b$ ) se han indicado que son fijos, después se ha cargado con un fichero en Microsoft Excel la velocidad de dichos puntos en cada instante de tiempo, obtenidos mediante la exportación de datos de Working Model 2D.

Las formulas utilizadas son las siguientes:

$$\left. \begin{aligned} V_{Bx} &= -r_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \omega_2 + -r_B \cdot \cos \theta_3 \cdot \omega_3 \\ V_{By} &= r_2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \omega_2 + r_B \cdot \sin \theta_3 \cdot \omega_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Velocidad del punto B} \quad (4.4)$$

En concreto las formulas escritas en Matlab 7.0 son:

$$\left. \begin{aligned} VXB(j) &= vBx(j) + vxa(j) \\ VYB(j) &= vBy(j) + vya(j) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Velocidades del punto B} \quad (4.5)$$

Donde  $vxa$  e  $vya$  son las velocidades en el eje X e Y respectivamente de los puntos cargados de WM 2D. Siendo  $vBx$  e  $vBy$  la velocidad del punto B que se obtienen siendo los puntos  $a$  y  $b$  fijos.

Finalmente los puntos  $VXB$  y  $VYB$  son la velocidad del punto B en cualquier instante de tiempo.



○ **Velocidad del punto B en el eje X con Matlab 7.0.**

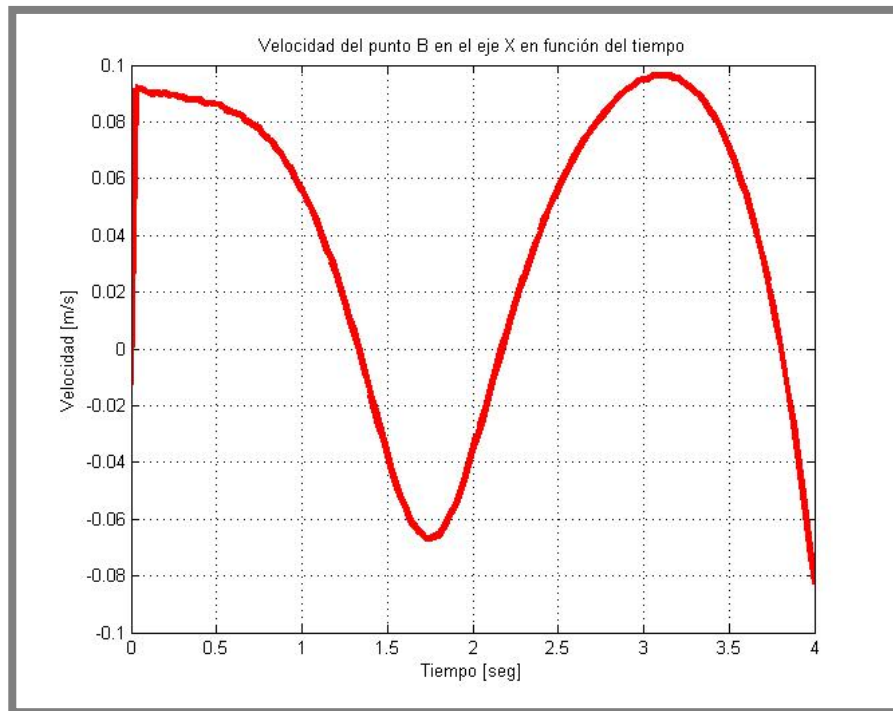


Figura 4.50: Velocidad del punto B en el eje X con Matlab 7.0.

○ **Velocidad del punto B en el eje X con Working Model 2D.**

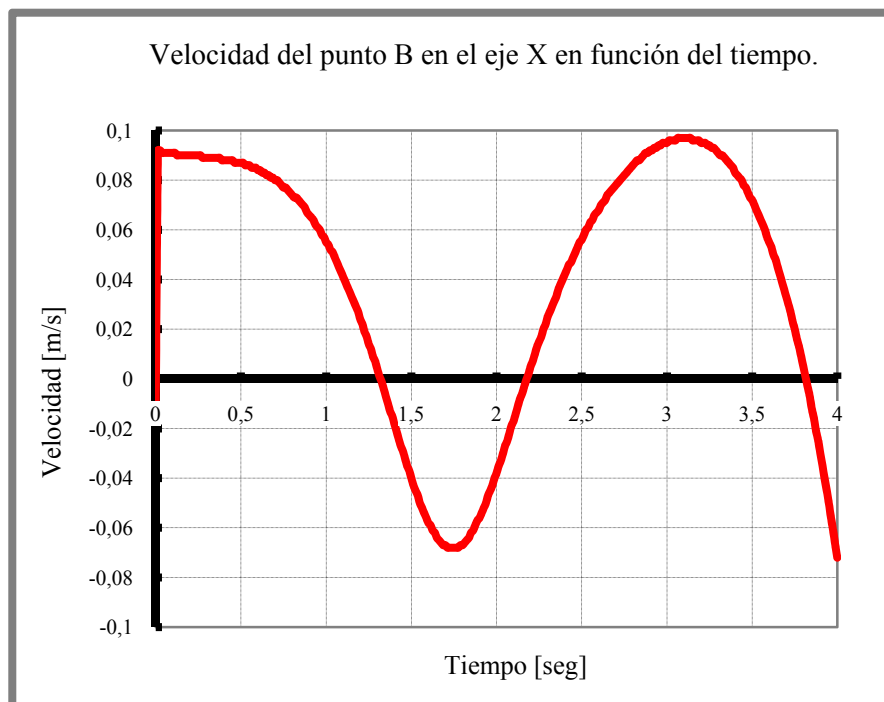


Figura 4.51: Velocidad del punto B en el eje X con Working Model 2D.

La figura 4.50 representa la evolución de la velocidad del punto B en el eje X obtenidas en Matlab 7.0 y la figura 4.51 representa la evolución de la velocidad del punto B en el eje X obtenidas en Working Model 2D. El tiempo de estudio son cuatro segundos, en los cuales el robot Pasibot realiza un paso.

En el instante inicial los valores que proporcionan Matlab y WM2D dan una velocidad inicial negativa, con un valor ligeramente inferior a 0 m/s (valores aproximativos). Nada más pasar del instante inicial, el pico de velocidad máxima que alcanza el punto B en ambos programas es semejante y se aproxima a 0,1 m/s.

Después ambas figuras mediante una pendiente negativa, alcanzan el mínimo de velocidad negativa cuando el robot Pasibot tiene el pie, que está realizando el paso, en la posición más alta en el eje Y (figuras 4.48 y 4.49). Este valor en Matlab es próximo a -0,07 m/s, ocurriendo lo mismo en WM 2D, ambas en un tiempo próximo a 1,75 segundos.

Tras alcanzar la velocidad mínima, ambas figuras muestran una pendiente positiva alcanzando un nuevo máximo, en el que coinciden ambos programas y que tiene un valor cercano a 0,1 m/s en un tiempo próximo a 3,1 segundos.

Al final después de alcanzar este máximo por parte de ambas figuras, las dos sufren con una pendiente negativa un descenso de la velocidad, alcanzando en el instante final una velocidad próxima a -0,08 m/s.

Estas mínimas diferencias de valores que se obtienen de ambos programas son debido al paso de integración, es decir, al número de decimales con que trabajan ambos programas. El cual realiza unos cálculos más o menos precisos en función del número de decimales.

○ **Velocidad del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.**

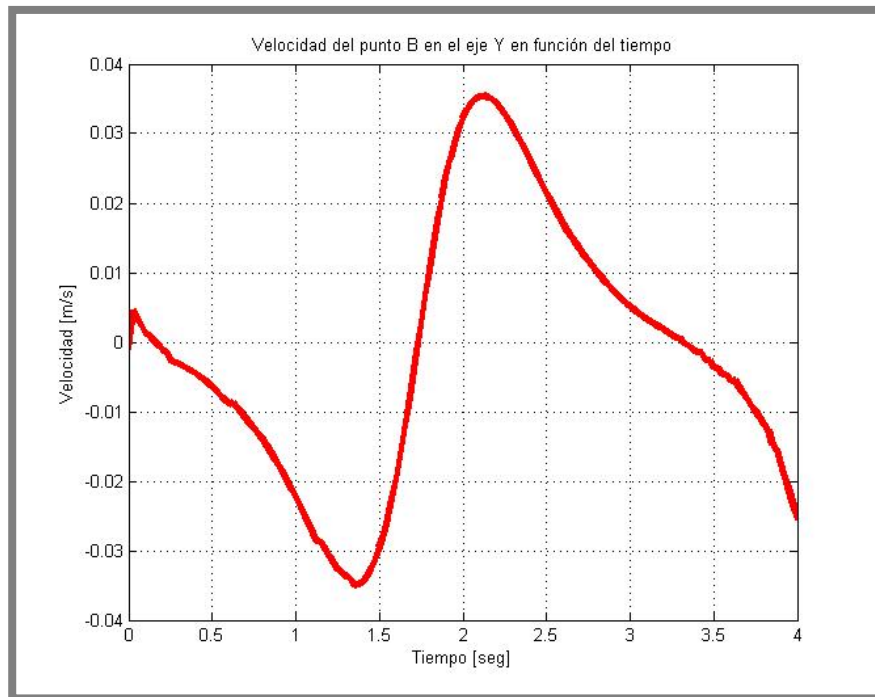


Figura 4.52: Velocidad del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.

○ **Velocidad del punto B en el eje Y con Working Model 2D.**

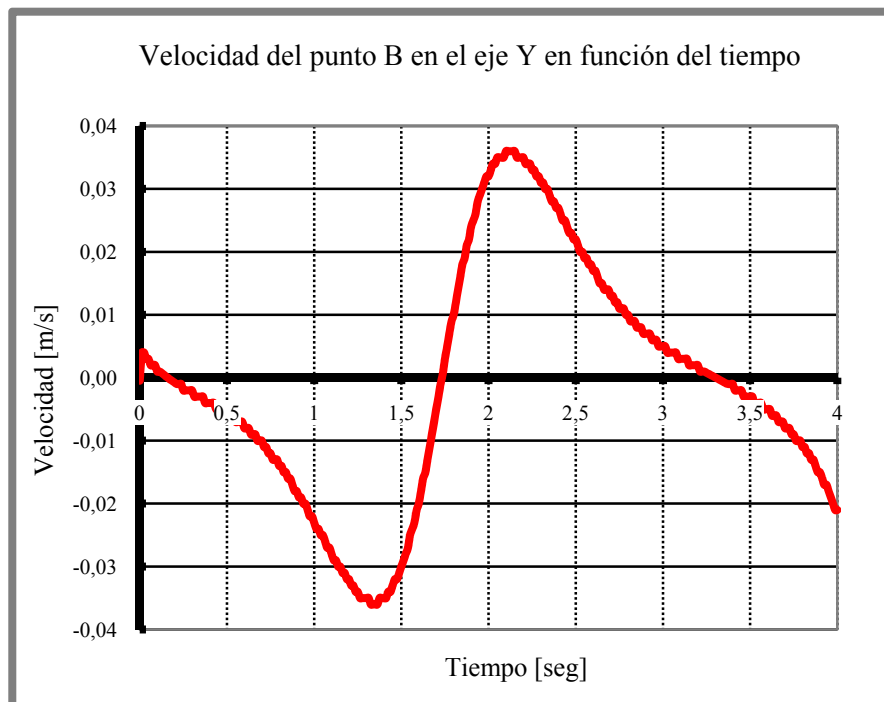


Figura 4.53: Velocidad del punto B en el eje Y con Working Model 2D.

La figura 4.52 refleja la velocidad del punto B en el eje Y obtenida en Matlab 7.0 y la figura 4.53 indica la velocidad del punto B en el eje Y obtenida en Working Model 2D. El tiempo de estudio son cuatro segundos, al igual que en casos anteriores, en los cuales el robot Pasibot realiza un paso.

Los valores en el instante inicial son próximos a cero metros por segundo. En Matlab el valor igual que en WM 2D, con una velocidad inicial cercana a 0,005 m/s.

Desde el instante inicial, ambas evoluciones sufren una velocidad con pendiente negativa hasta que alcanzan el mínimo de velocidad. En este instante la diferencia entre ambos programas es inapreciable. Ambos programas proporcionan una velocidad mínima de -0,035 m/s. Ambas en un tiempo de 1,3 segundos.

Tras alcanzar la velocidad mínima, ambas evoluciones mediante una pendiente positiva, alcanzan una velocidad máxima, igual en ambos programas y de valor cercano a 0,035 m/s. Ambas en un tiempo de 2,2 segundos.

Finalmente, tras alcanzar la velocidad máxima, ambas figuras sufren un descenso de la velocidad con una pendiente negativa, alcanzando, en Matlab una velocidad final de -0,025 m/s y en WM 2D una velocidad final de -0,02 m/s.

Las diferencias, que a diferencia de figuras anteriores son notables, son debidas al paso de integración de los dos programas, es decir, al número de decimales con que trabajan ambos programas.

○ Aceleración del punto B.

La aceleración se ha realizado igual que la posición y la velocidad del punto B. Solo se debe saber que los puntos superiores de la Cadera ( $a$  y  $b$ ) siguen siendo considerados fijos en Matlab y que se han cargado el valor de sus aceleraciones mediante un archivo Excel obtenido con Working Model 2D.

Las formulas utilizadas son:

$$\left. \begin{aligned} a_{Bx} &= -r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos \theta_2 - r_B \cdot \alpha_3 \cdot \sin \theta_3 - r_B \cdot \omega_3^2 \cdot \cos \theta_3 \\ V_{By} &= r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \sin \theta_2 + r_B \cdot \omega_3^2 \cdot \sin \theta_3 + r_B \cdot \alpha_3 \cdot \cos \theta_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Aceleración del punto B} \quad (4.6)$$

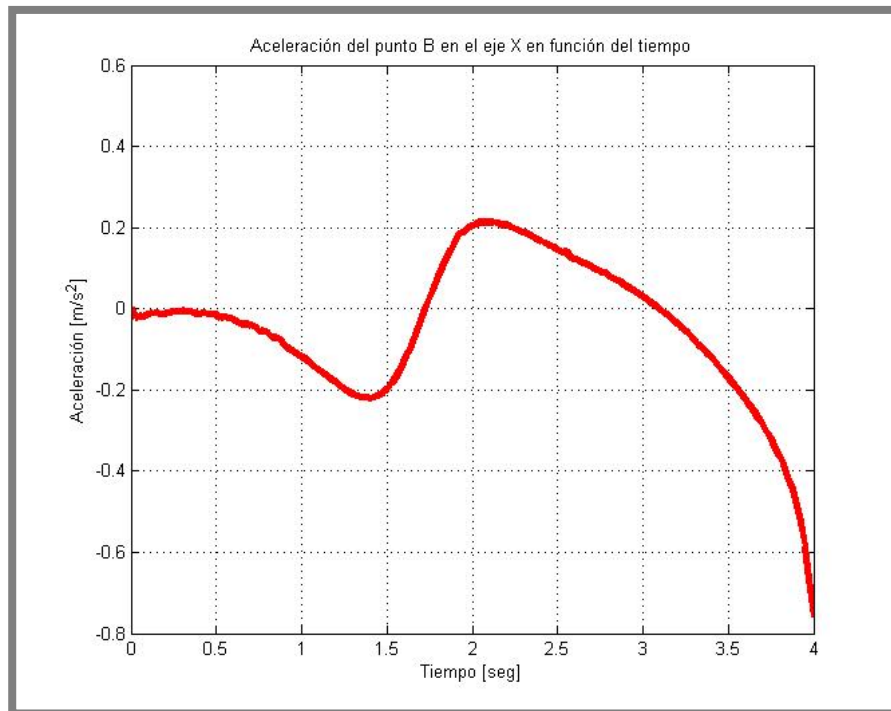
En concreto las formulas escritas en Matlab 7.0 son:

$$\left. \begin{aligned} AXB(j) &= ABx(j) + axa(j) \\ AYB(j) &= ABY(j) + aya(j) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Aceleraciones del punto B} \quad (4.7)$$

Donde  $axa$  e  $aya$  son las aceleraciones en el eje X e Y respectivamente del punto  $a$ , obtenidos con WM 2D. Siendo  $ABx$  e  $ABY$  la aceleración del punto B que se obtienen siendo los puntos  $a$  y  $b$  fijos.

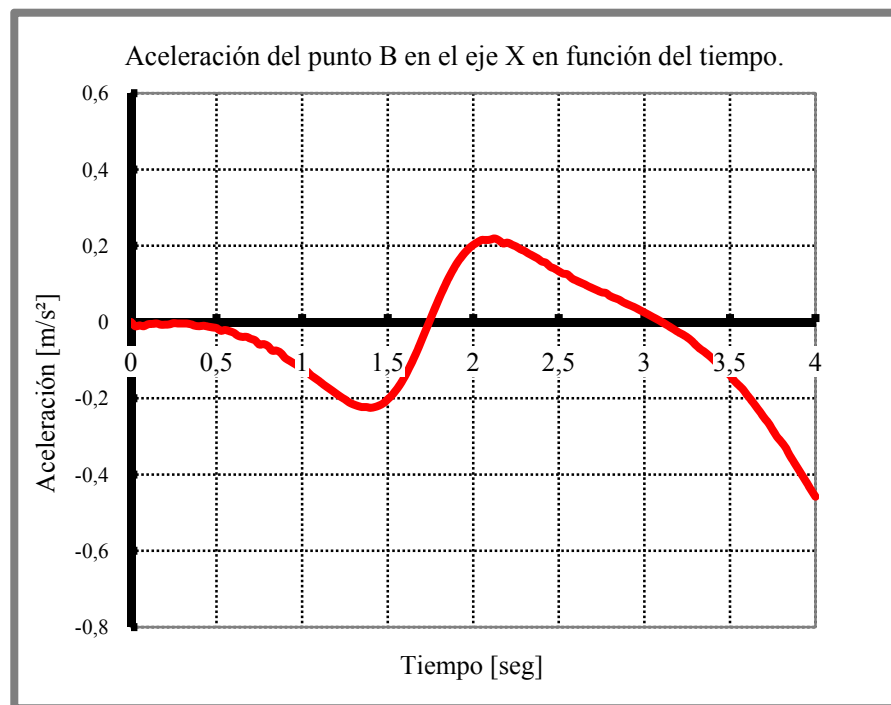
Finalmente los puntos  $AXB$  y  $AYB$  son la aceleración del punto B en cualquier instante de tiempo.

○ **Aceleración del punto B en el eje X con Matlab 7.0.**



**Figura 4.54: Aceleración del punto B en el eje X con Matlab 7.0.**

○ **Aceleración del punto B en el eje X con Working Model 2D.**



**Figura 4.55: Aceleración del punto B en el eje X con Working Model 2D.**

La figura 4.54 representa la evolución de la aceleración del punto B en el eje X obtenidas en Matlab 7.0 y la figura 4.55 representa la evolución de la aceleración del punto B en el eje X obtenidas en Working Model 2D. El tiempo de estudio son cuatro segundos, en los cuales el robot Pasibot realiza un paso.

La aceleración inicial que proporciona Matlab y WM 2D son iguales con un valor próximo a  $0 \text{ m/s}^2$ . Tras alcanzar la aceleración inicial, su evolución no varía durante un periodo muy corto de tiempo, para después descender con una pendiente negativa y alcanzar un mínimo, de valor próximo a  $0,22 \text{ m/s}^2$  cuando el tiempo refleja aproximadamente 1,4 segundos.

Al llegar a este mínimo, la tendencia de la evolución cambia produciéndose una pendiente positiva. Llegando al máximo de la aceleración a lo largo de la simulación, que tiene un valor próximo a  $0,21 \text{ m/s}^2$  cuando el tiempo ha sobrepasado ligeramente 2,1 segundos.

Finalmente, la pendiente de la evolución vuelve a cambiar (siendo negativa) y alcanzando una aceleración negativa (para un tiempo de 4 segundos).

En esta aceleración final, sí se produce una diferencia notable de la aceleración, siendo en Matlab un valor próximo a  $-0,75 \text{ m/s}^2$  y en WM 2D un valor cercano a  $-0,45 \text{ m/s}^2$ .

La mínima diferencia notable en la aceleración final se debe al número de decimales con el que trabaja cada programa, que hace obtener unos resultados más o menos precisos en función del número de decimales con el que se trabaja.

○ **Aceleración del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.**

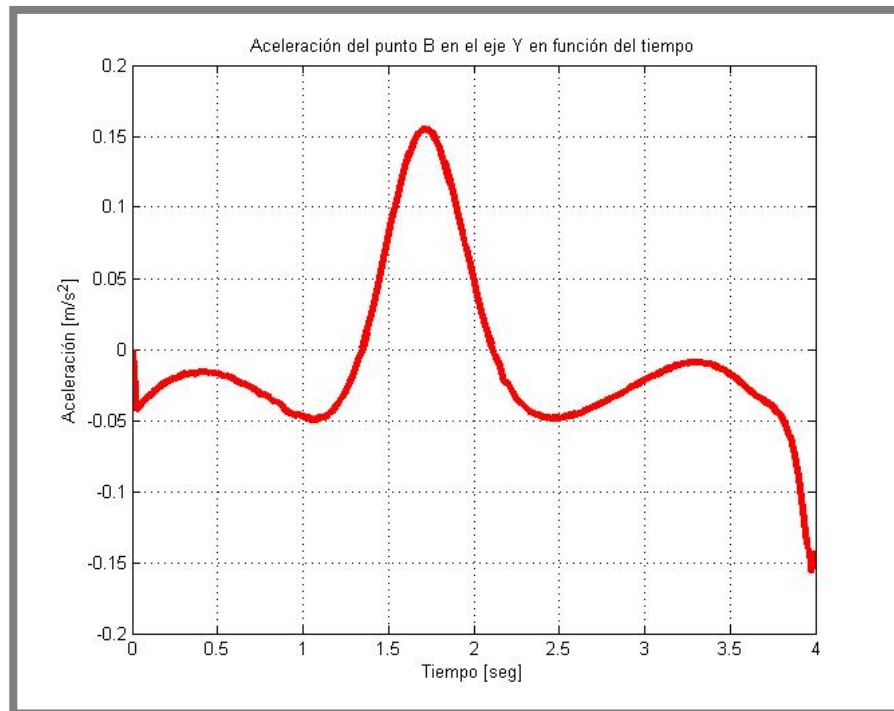


Figura 4.56: Aceleración del punto B en el eje Y con Matlab 7.0.

○ **Aceleración del punto B en el eje Y con Working Model 2D.**

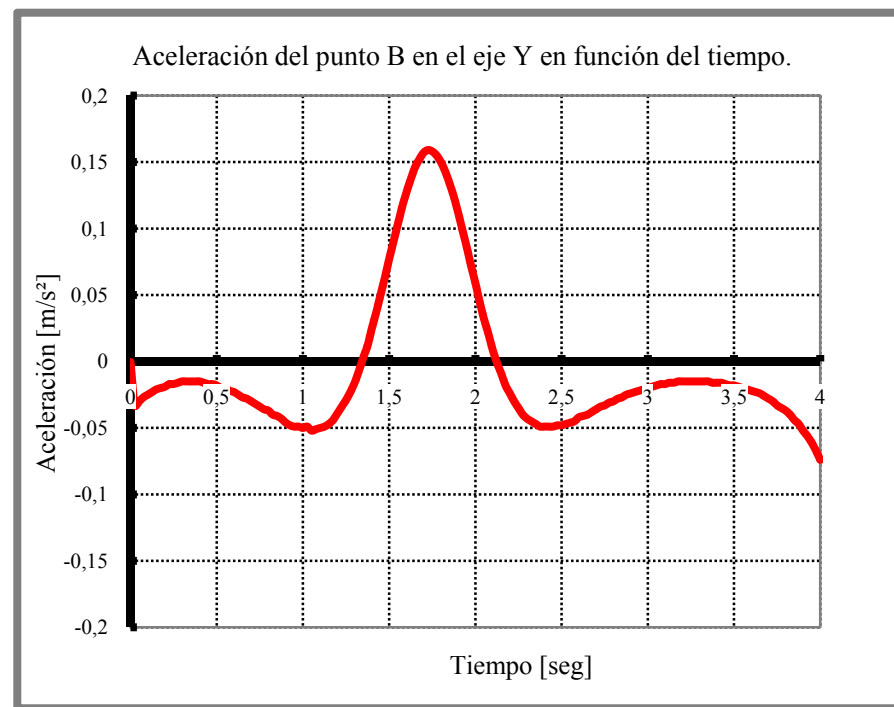


Figura 4.57: Aceleración del punto B en el eje Y con Working Model 2D.



La figura 4.56 representa la evolución de la aceleración del punto B en el eje Y obtenidas en Matlab 7.0 y la figura 4.57 representa la evolución de la aceleración del punto B en el eje Y obtenidas en Working Model 2D. El tiempo de estudio son cuatro segundos, en los cuales el robot Pasibot realiza un paso.

La aceleración inicial en ambos programas son iguales, con un valor próximo a 0 m/s<sup>2</sup>. Tras la aceleración inicial, con una pendiente negativa, la aceleración desciende alcanzando valores próximos a -0,045 m/s<sup>2</sup> en Matlab y en WM 2D -0,25 m/s<sup>2</sup>.

Al alcanzar ese mínimo la aceleración aumenta ligeramente para volver a descender y alcanzar unas deceleraciones de -0,05 m/s<sup>2</sup> en ambos programas.

Después de alcanzar ese mínimo, la aceleración sufre un gran incremento alcanzando el máximo de la aceleración en el eje Y, con un valor de 0,16 m/s<sup>2</sup> aproximadamente cuando han transcurrido 1,75 segundos, correspondiendo al instante en el que el robot Pasibot aproxima la pierna a su posición más alta (máximo valor positivo en el eje Y, figuras 4.48 y 4.49).

Nada más alcanzar ese máximo, se produce una deceleración alcanzándola con una pendiente negativa. Llegando a un valor de -0,05 m/s<sup>2</sup> cuando han transcurrido 2,4 segundos.

Por último, al alcanzar este tercer mínimo, la aceleración aumenta ligeramente (alcanzando aceleraciones de -0,02 m/s<sup>2</sup> aproximadamente) para después volver a reducirse alcanzando la aceleración final.

Esta aceleración es distinta en ambos programas, en Matlab la aceleración final es de -0,15 m/s<sup>2</sup> y en WM 2D la aceleración final es de -0,075 m/s<sup>2</sup>.

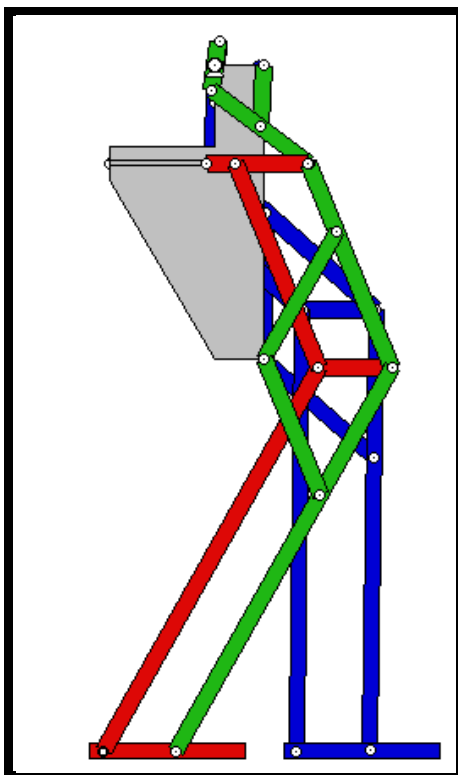
La mínima diferencia de valores de la aceleración se debe al número de decimales con el que trabaja cada programa.

#### **4.2.2.- Estudio del segundo mecanismo.**

En este segundo estudio, se han partido de los resultados obtenidos en el primer mecanismo. A partir del cual, se obtiene la posición del Talón del robot Pasibot. Mediante la comprobación de la posición del Talón del robot Pasibot con el modelo matemático y viendo que es igual que el modelo obtenido en Working Model 2D, se puede decir que la comprobación es correcta y que el modelo simplificado con Working Model 2D es válido para la obtención de resultados.

En el segundo mecanismo, además de trabajar con la Manivela, la Biela y el Balancín del primer mecanismo, se trabajara con el Fémur, el Tendón Superior, el Tendón Inferior y la Tibia. Se estudiará solo la posición del Talón de una de las piernas (correspondiente a la pierna izquierda de color rojo, ya que se deberán comprobar los resultados con los obtenidos en el caso 3).

En la figura 4.58 se representan en color verde las piezas con las que se trabajaran en Matlab:



**Figura 4.58: Representación de color verde de las piezas del robot Pasibot.**

En la figura siguiente (figura 4.59) se representa la estructura simplificada sobre la que se ha trabajado con un modelo matemático en Matlab. Además se señala en rojo el punto A, que es el punto sobre el que se sacaran datos, para hacer la comprobación con los datos obtenidos en Working Model 2D de ese mismo punto.

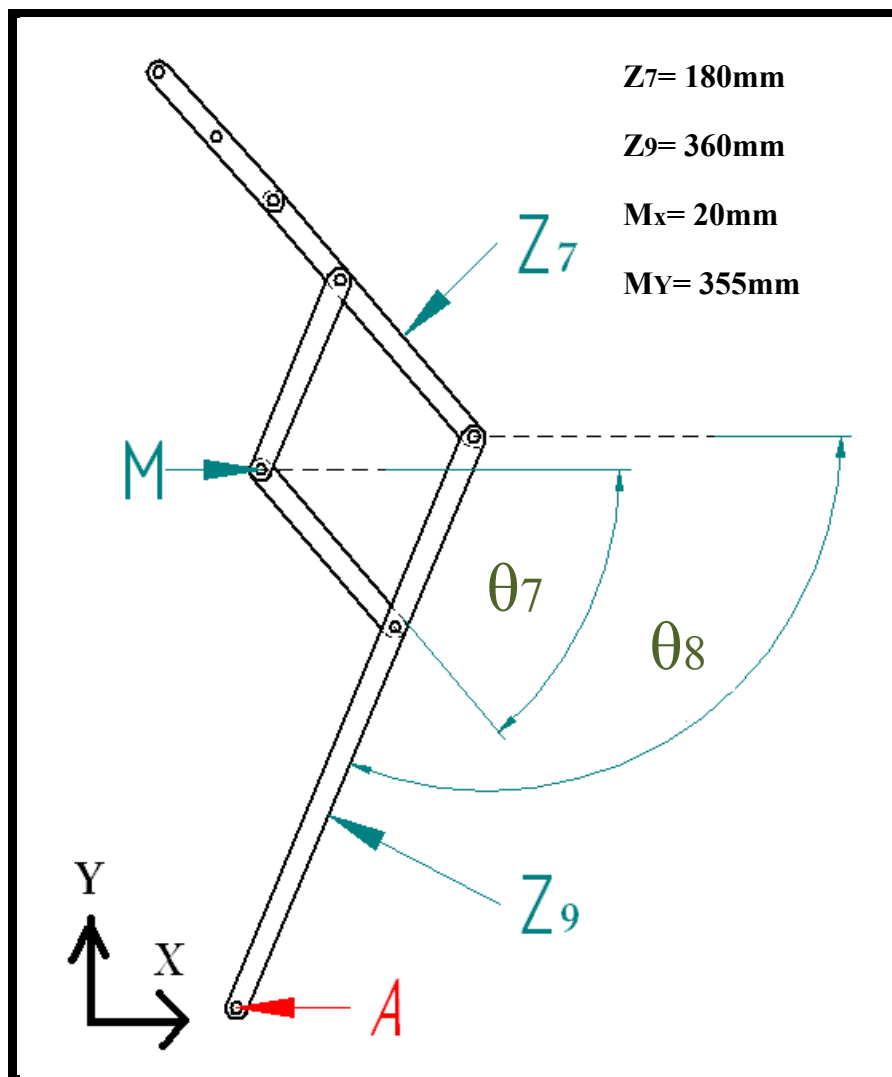


Figura 4.59: Mecanismo simplificado y señalización del punto A.

Como en el primer mecanismo, el origen del sistema de referencia está lo más próximo posible al Talón I (representado de forma esquemática en la figura 4.59).

Sobre el punto A (figura 4.59) se obtendrán gráficas de la posición con un modelo matemático en Matlab. Estos datos se comprobarán con el modelo realizado en Working Model 2D, en concreto con el caso 3 (ya que en el caso 4 las dimensiones son distintas). El punto A corresponde con el punto de unión número 14 (figura 3.28).

○ Posición del punto A.

Como ocurrió en el primer mecanismo, el modelo matemático de Matlab utiliza ciertos puntos como puntos fijos que no se mueven (en concreto los puntos  $a$ ,  $b$ ,  $M$  de la figura 4.60). Para que se ajusten a los datos calculados con Working Model 2D, se han calculado con WM 2D las posiciones de dichos puntos y cargados al programa Matlab. Así los resultados de ambos programas se deben ajustar para dar lo más parecido posible.

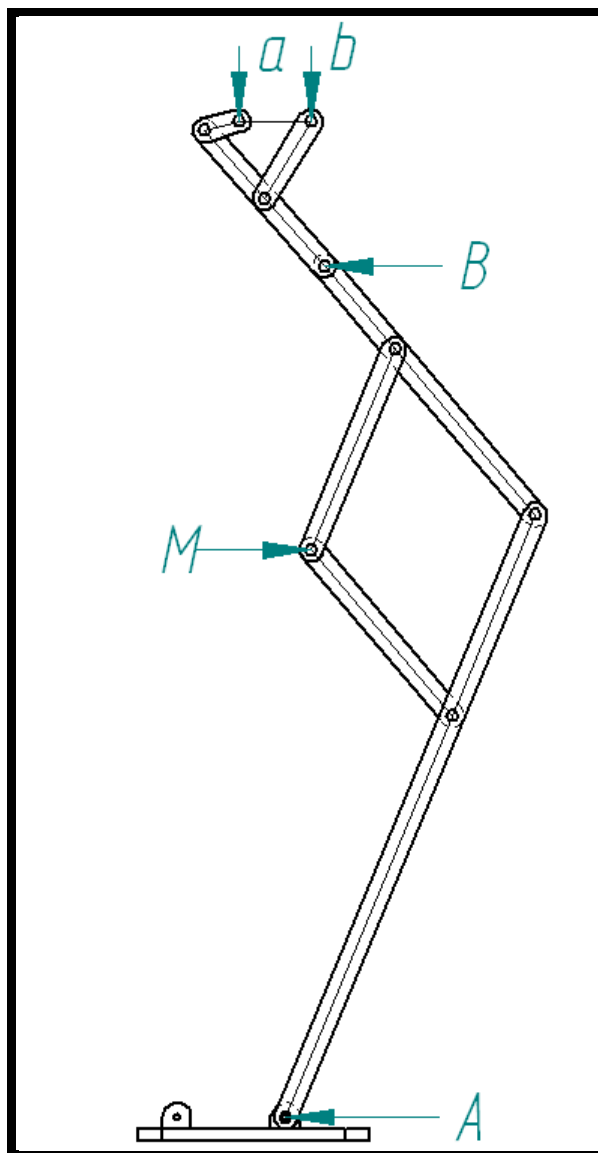


Figura 4.60: Señalización de los puntos  $a$ ,  $b$ ,  $M$ ,  $B$ ,  $A$ .

Para la obtención de las posiciones del punto A se han cargados las posiciones del punto B en todo instante de tiempo, obtenidas en el primer mecanismo.

A partir de los datos de la posición en el punto B se han utilizado expresiones matemáticas para que Matlab proporcione la posición del punto A en todo instante de tiempo.

Con estas indicaciones, se presentan las formulas utilizadas:

$$\left. \begin{aligned} X_A &= -z_9 \cdot \cos \theta_8 + M_X + z_7 \cdot \cos \theta_7 \\ Y_A &= M_Y + z_7 \cdot \sin \theta_7 - z_9 \cdot \sin \theta_8 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{Posiciones del punto A} \quad (4.8)$$

En concreto las formulas escritas en Matlab 7.0 son:

$$\left. \begin{aligned} xA(i) &= ((r_6) + (r_7)) \cdot (\cos(\theta_6(i))) + XB(i) + ((r_8) + (r_9)) \cdot (\cos(\theta_8(i))) \\ yA(i) &= ((r_6) + (r_7)) \cdot (\sin(\theta_6(i))) + YB(i) - ((r_8) + (r_9)) \cdot (\sin(\theta_8(i))) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Posiciones del punto A} \quad (4.9)$$

En la ecuación 4.9,  $XB$  e  $YB$  son la posición del punto B en cada instante de tiempo cargado en el programa Matlab a partir de los resultados obtenidos en el primer mecanismo.

El resto son operaciones matemáticas a partir de los datos que se representan en la figura 4.59. El comando  $(i)$  indica que señale la posición del punto A en cada incremento de tiempo.

Finalmente las variables  $xA$  y  $yA$  son la posición del punto A en cualquier instante de tiempo.

Se debe comentar que el periodo de tiempo sobre el que se ha realizado esta comprobación son cuatro segundos, tiempo suficiente para que el robot Pasibot realice el paso con una velocidad del Motor de 59,296 °/s (aproximadamente 1 rad/s).

○ **Posición del punto A en el eje X con Matlab 7.0.**

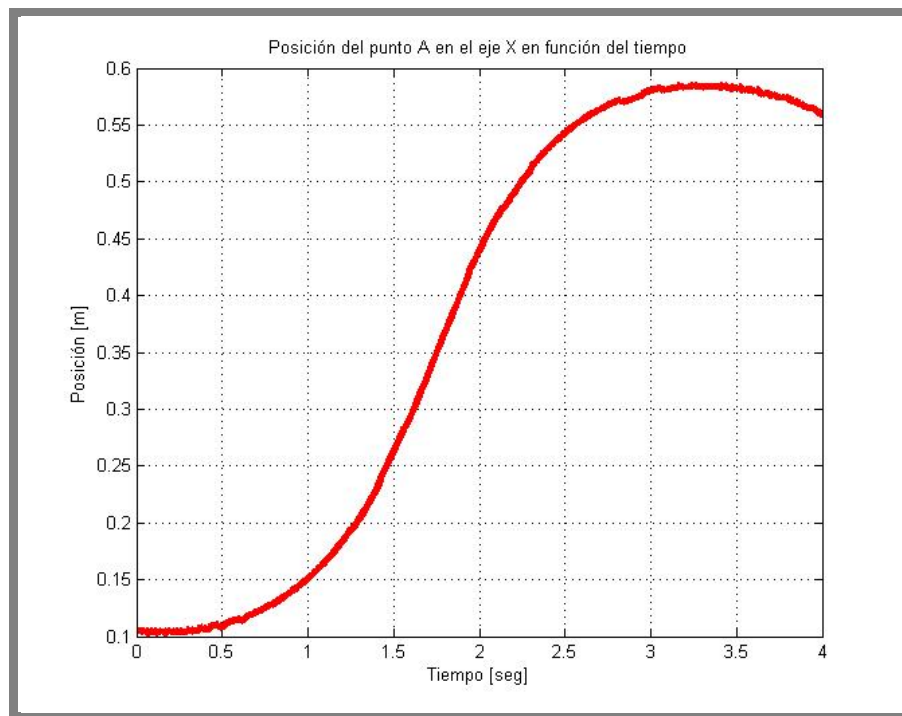


Figura 4.61: Posición del punto A en el eje X con Matlab 7.0.

○ **Posición del punto A en el eje X con Working Model 2D.**

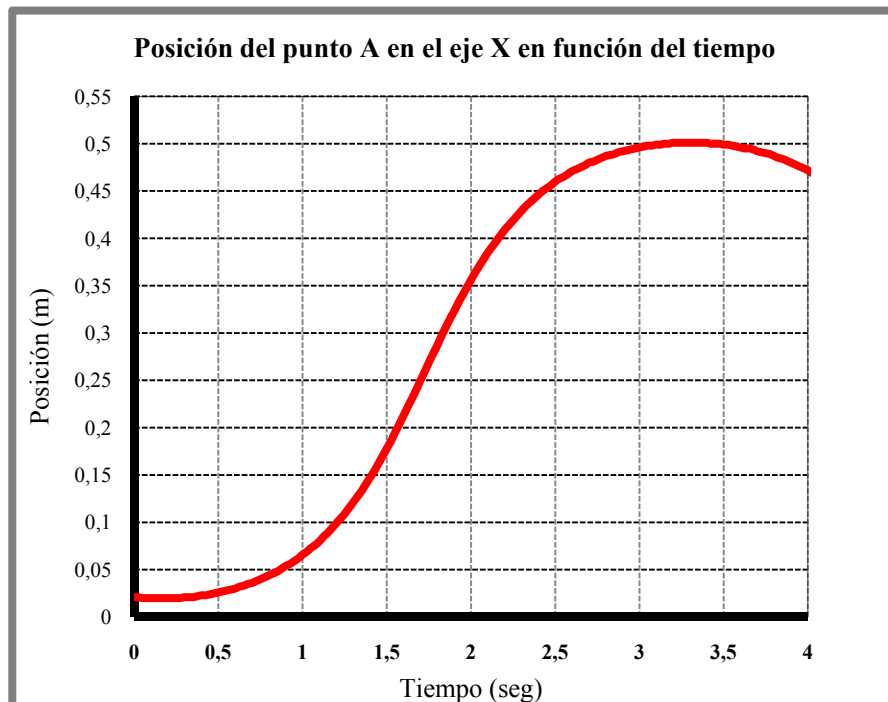


Figura 4.62: Posición del punto A en el eje X con Working Model 2D.

La figura 4.61 representa la posición en el eje X del punto A (figura 4.59) obtenida con el modelo matemático del programa Matlab. La figura 4.62 refleja la posición del mismo punto pero obtenida con la simulación realizada en Working Model 2D.

Destacar que en ambas figuras existe una diferencia, que permanece constante a lo largo de todo el tiempo de estudio, de valores mínima (aproximadamente un valor de 0,08 metros), esta diferencia se puede dar por el número de decimales con los que trabaja cada programa, lo que provoca unos resultados más o menos precisos según se usen más o menos decimales respectivamente.

Por lo demás se observa una evolución semejante con ambos programas. Inicialmente como se explicó en páginas anteriores, el origen del sistema de referencia se encuentra lo más próximo posible al Talón del robot Pasibot.

A medida que el robot Pasibot realiza el paso, se produce un incremento de la posición en el eje X del Talón. Produciéndose una mayor pendiente y avanzando más cuando el pie se aproxima y se aleja de la posición más alta (coordenada Y). Por lo tanto, se produce un menor incremento cuando el robot Pasibot inicia y finaliza el paso.

Por último destacar que al acabar de realizar el paso del robot Pasibot, se produce un descenso de la posición en el eje X con ambos programas. Esto se debe a que al terminar el paso, el robot Pasibot retrocede ligeramente el pie para poder ajustarlo bien a la superficie que ejerce de suelo y así poder realizar más adelante un segundo paso, es decir, para equilibrarse.

○ **Posición del punto A en el eje Y con Matlab 7.0.**

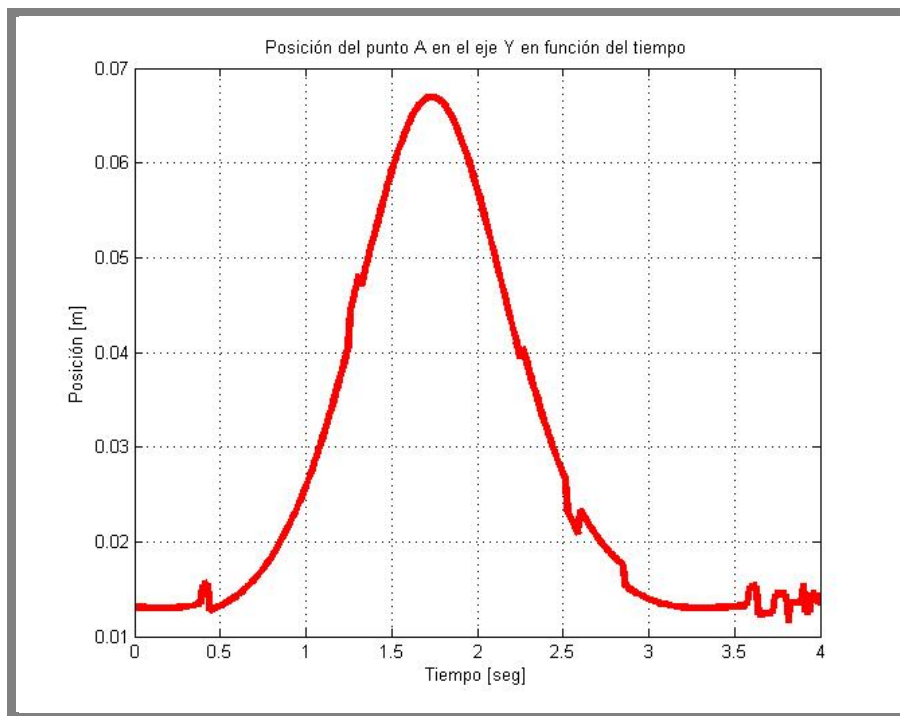


Figura 4.63: Posición del punto A en el eje Y con Matlab 7.0.

○ **Posición del punto A en el eje Y con Working Model 2D.**

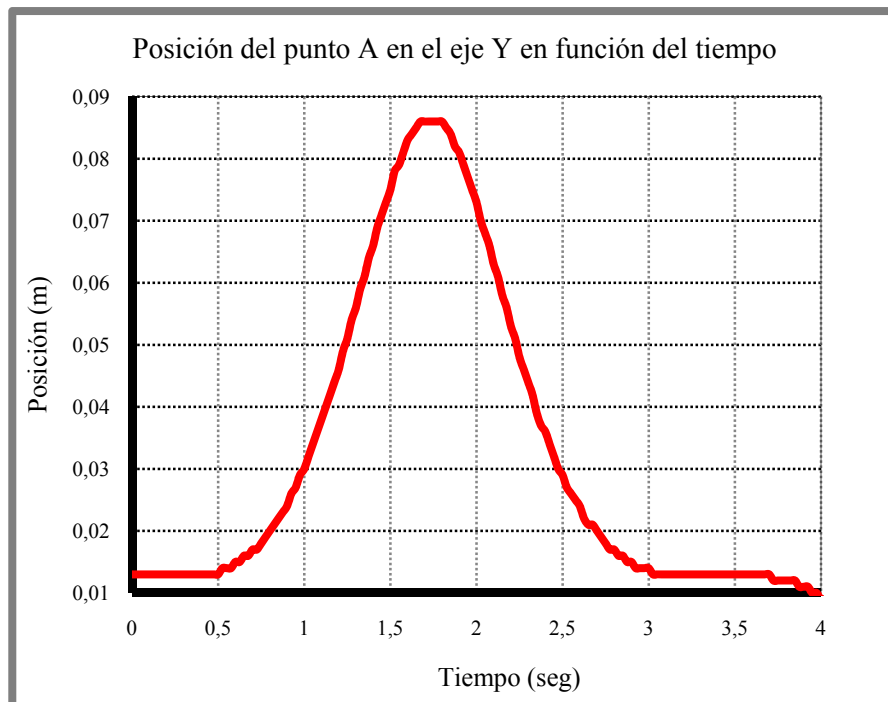


Figura 4.64: Posición del punto A en el eje Y con Working Model 2D.



La figura 4.63 representa la posición en el eje Y del punto A (figura 4.59) obtenida con el modelo matemático del programa Matlab. La figura 4.64 refleja la posición del punto A pero obtenida con Working Model 2D.

Como ocurrió en las figuras anteriores (figuras 4.61 y 4.62), en ambas figuras existen una variación de valores que se puede apreciar cuando el punto A llega al máximo valor de la posición en el eje Y, esta variación de valores es próxima a 0,020 metros. En el inicio y final del paso esta diferencia no ocurre tan claramente y los valores en ambas figuras son similares. La diferencia se puede dar por el número de decimales con los que trabaja cada programa, lo que provoca unos resultados más o menos precisos según se usen más o menos decimales respectivamente. También se da porque en el caso de Matlab no se consideran los contactos con el suelo, produciéndose los picos cuando se dan los choques contra el suelo.

En el instante inicial (con un tiempo de cero segundos) el valor de la posición en el eje Y tiene un valor aproximado de 0,013 metros. Este valor no es cero, porque el punto A se encuentra a la mitad del rectángulo que representa el pie del robot Pasibot, es este pie el que está en contacto con el suelo (la cara inferior).

Al iniciar el paso la posición en el eje Y del punto A se incrementa hasta que el pie del robot Pasibot alcanza la posición más alta en el eje Y (cuando han transcurrido 1,75 segundos). Tras alcanzar este máximo, la posición en el eje Y del punto A sufre un decremento, para que cuando el robot Pasibot este terminando el paso, los valores de la posición del punto A en el eje Y se aproximen a los valores iniciales (en concreto 0,013 metros en Matlab y 0 metros en WM 2D).

---

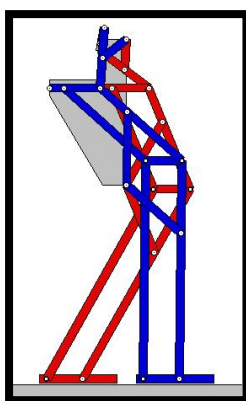
# Capítulo 5

**Análisis Dinámico del robot Pasibot.**

## **5.1.- Análisis dinámico del robot Pasibot con Working Model 2D.**

En el capítulo 5 se realizará un análisis dinámico de las partes del robot Pasibot más interesantes. El modelo con el que se trabajará en el estudio dinámico es el mismo que se ha seguido en el capítulo 4, con las mismas características y las mismas dimensiones.

En la figura 5.1 se observa el robot Pasibot sobre el que se ha trabajado:



**Figura 5.1: Robot Pasibot diseñado con Working Model 2D.**

En la figura 5.1 se ha representado en color azul la pierna derecha y en color rojo la pierna izquierda, los elementos comunes del robot se representan en color gris.

El movimiento del robot Pasibot ya fue representado en el capítulo 4 mediante la figura 4.2.

Para la comprensión de los resultados que más adelante se podrán observar se deben tener en cuenta las características geométricas (en el capítulo 3, tabla 3.1) y las características dinámicas (en el capítulo 4 la tabla 4.1, donde se comentan el motivo de utilizar dichas características).

Las piezas que se han seleccionado para realizar el estudio dinámico han sido las que resultan de mayor interés para un posible diseño en un futuro del modelo real.

Estas piezas son las siguientes:

- Pie I: Eslabón que representa el pie izquierdo del robot Pasibot.
- Pie D: Eslabón que representa el pie derecho del robot Pasibot.
- Rodilla I: Eslabón que une los puntos articulados de la Rodilla Trasera I y la Rodilla Delantera I (perteneciente a la pierna izquierda).
- Rodilla D: Eslabón que une los puntos articulados de la Rodilla Trasera D y la Rodilla Delantera D (perteneciente a la pierna derecha).
- Cadera: En este caso no representa el Centro de Gravedad sino toda la pieza de la Cadera.
- Motor. Localizado en el punto que une la Cadera y la Manivela. Donde el Motor actúa. Transmite el trabajo producido por el Motor sobre la Manivela, donde se unen las Bielas de cada pierna que permite el movimiento.

Para la aclaración de estas piezas se puede observar la Figura 3.6.

Por la diferencia de valores en el estudio dinámico de cada una de las piezas del robot Pasibot, se ha decidido separar todas las piezas de estudio en tres grandes bloques para poder apreciar con claridad la evolución de cada pieza.

En un primer bloque se estudian: Pie D, Pie I, Rodilla D y Rodilla I. De estas piezas se han estudiado: las fuerzas en el eje X ( $F_x$ ) y en el eje Y ( $F_y$ ), el módulo de la fuerza  $|F|$ , el Par.

En un segundo bloque se estudia por separado la pieza que representa la Cadera, del cual se han estudiado: las fuerzas en el eje X ( $F_x$ ) y en el eje Y ( $F_y$ ), el módulo de la fuerza  $|F|$ , el Par.

Los resultados obtenidos en las diferentes figuras están expresados respecto al centro de masas de las piezas que se están estudiando.

En el tercer y último bloque lo que se estudia por separado son los resultados dinámicos del Motor, en concreto: el Par y la Potencia. La Rotación, la Velocidad de Rotación y la Aceleración de Rotación no se estudian porque no resulta de interés a la hora de hacer un estudio dinámico, ya que fijando un valor de la velocidad del Motor constante su aceleración debe ser nula.

De esta manera se estudian, de forma más clara y directa, todas las posibilidades que proporciona Working Model 2D.

El intervalo del estudio dinámico depende del movimiento del robot Pasibot, pero el periodo de estudio ha sido por norma general de 10 segundos. En las figuras, los límites de tiempo se ajustaran en función de los resultados, observando la variación que más interesa en cada caso.

En los dos primeros casos, la velocidad del Motor es de cero radianes por segundo, es decir, la función del Motor es nula, aún así se han obtenido los resultados para su comprobación. En el tercer y cuarto caso, el Motor sí tiene una velocidad que en el programa se expresa en grados por segundos que permite al robot Pasibot avanzar dando pasos.

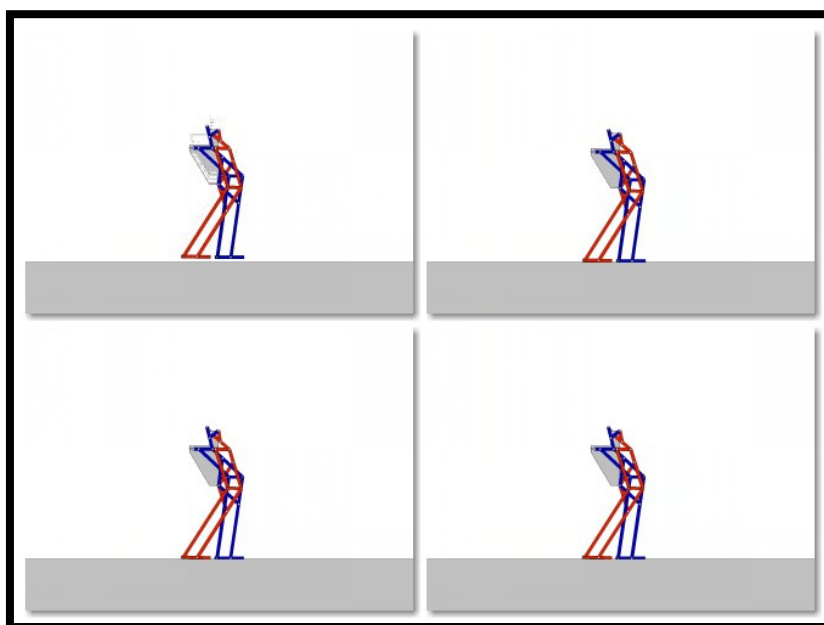
Se ha decidido eliminar de este estudio el momento lineal (o cantidad de movimiento) porque con el estudio cinemático se puede sacar, ya que la cantidad de movimiento es una magnitud que se obtiene de multiplicar la masa por la velocidad lineal.

Lo mismo ocurre con el momento angular que es una magnitud resultante de multiplicar el tensor de inercia por la velocidad angular y con los resultados obtenidos en páginas anteriores se pueden obtener directamente.

## 1º. Caso 1: Robot Pasibot parado con los dos pies a la misma altura.

En este caso se debe destacar que la velocidad del Motor es de cero radianes por segundo. Tanto el pie derecho como el pie izquierdo están a la misma altura. Además, inicialmente es difícil ajustar el robot en contacto con el suelo, por lo que se ha establecido una posición inicial de simulación en la que los pies están a una altura aproximada de 0,1 metros. Este movimiento de caída por efecto de la gravedad se eliminará del estudio dinámico siendo el instante inicial cuando han transcurrido 0,5 segundos.

El único movimiento que hace el robot Pasibot al iniciar la simulación es caer por el efecto de la gravedad hasta ponerse en contacto con el suelo, y luego equilibrarse hasta quedarse en reposo. Este leve movimiento se muestra en la figura 5.2:



**Figura 5.2: Movimiento del robot Pasibot en el caso 1.**

A continuación se dispone a comentar los resultados obtenidos mediante la exportación de los datos obtenidos de Working Model 2D al programa Microsoft Excel para la representación en gráficos y así tener una visualización más sencilla para su análisis.

- Fuerza en los eslabones.

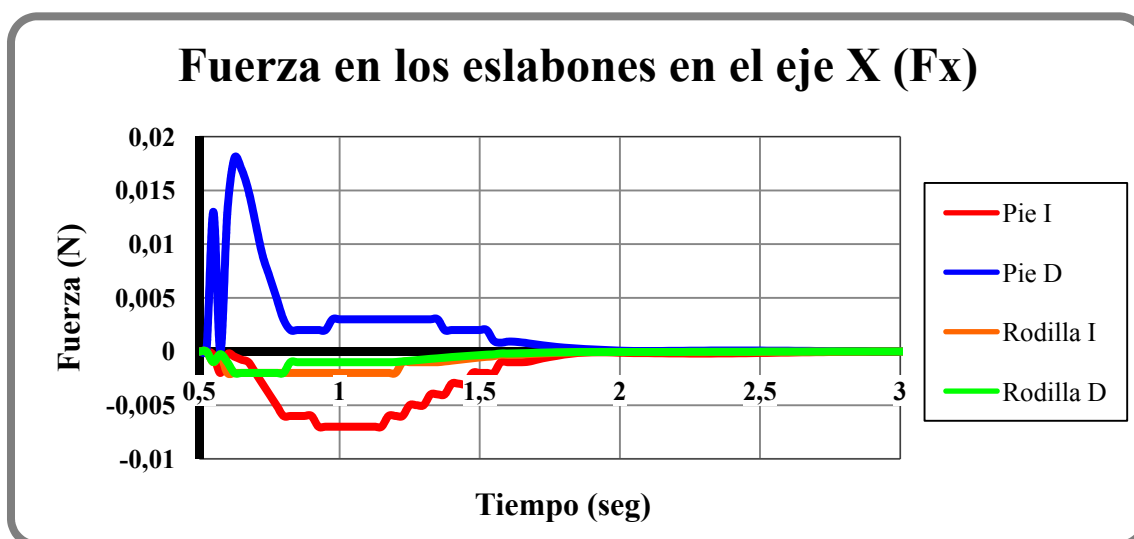


Figura 5.3: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 1).

El tiempo de estudio se ha reducido para poder observar bien la evolución de la fuerza, desde el instante inicial ( $t=0,5$  segundos) hasta un instante en el que el robot Pasibot se encuentra en equilibrio.

Cuando el robot Pasibot está en contacto con el suelo, trata de ponerse en equilibrio oscilando respecto a su punto de equilibrio. Para realizar este movimiento, el robot Pasibot produce unas reacciones que hace aumentar la fuerza en el eje X de manera considerable, como se puede observar en la figura 5.3.

La fuerza aumenta para luego reducirse oscilando de manera considerable en torno a un valor que depende del eslabón que se esté estudiando. Cuando esa oscilación decrece, los valores de la fuerza en el eje X tienden a cero, que es cuando han transcurrido menos de 2 segundos. Como se ha comentado anteriormente cuando han transcurrido aproximadamente 1,9 segundos el robot Pasibot ya se encuentra en su posición de equilibrio.

La fuerza máxima de valor positivo la alcanza el Pie D cuando han transcurrido 0,625 segundos con un valor de 0,018 N. Por el contrario el Pie I alcanza valores máximos pero negativos con un valor de -0,007 N cuando han transcurrido 0,95 segundos.

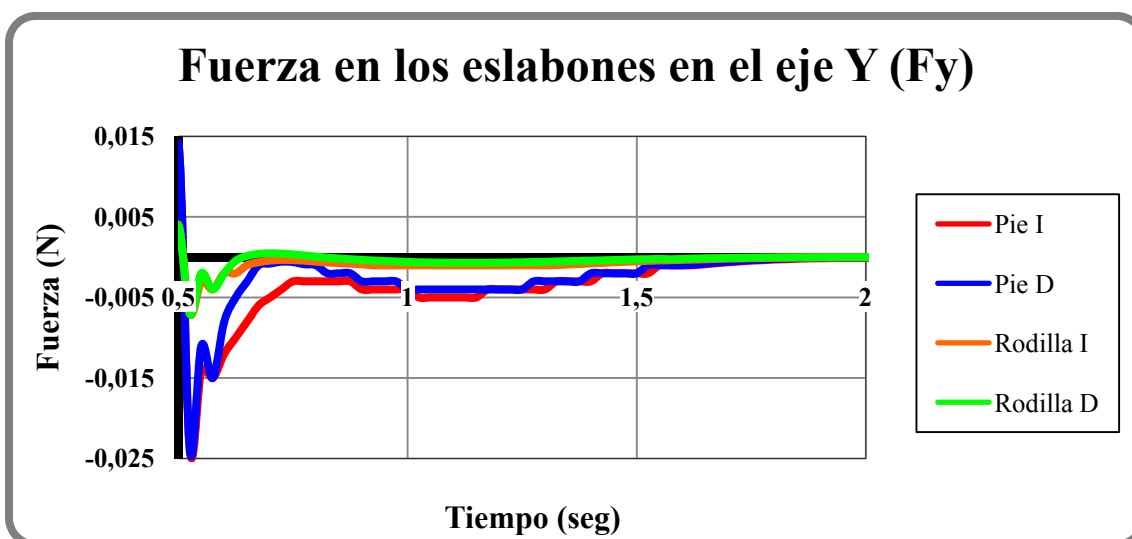


Figura 5.4: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 1).

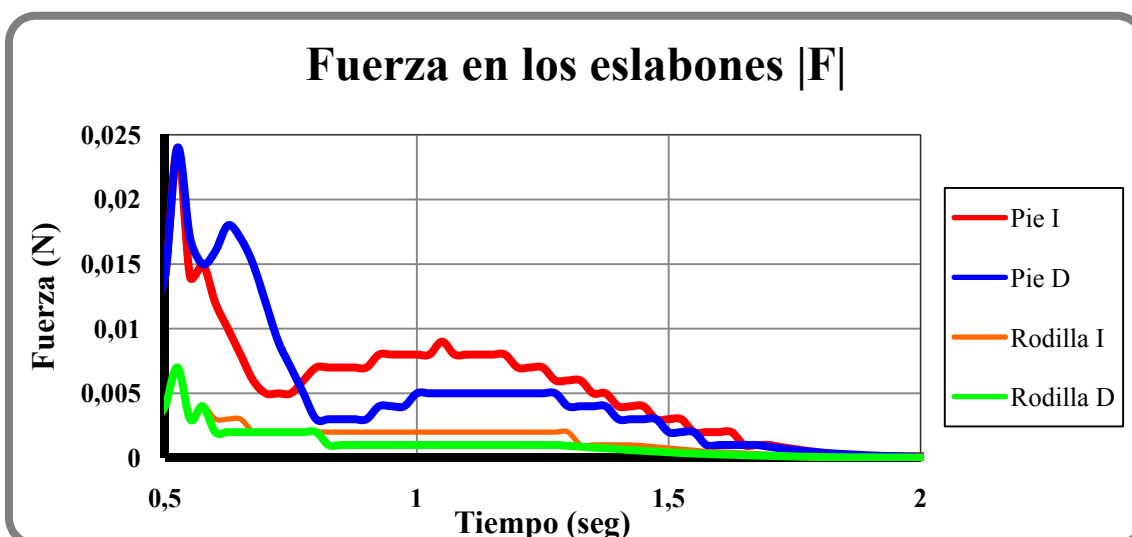


Figura 5.5: Evolución del módulo de la fuerza en función del tiempo (Caso 1).

En la figura 5.4 se observa como el valor de las reacciones de los pies y las rodillas suben y bajan oscilando. Esa oscilación se va reduciendo para que, cuando han transcurrido 1,9 segundos, el valor de la fuerza en el eje Y tiene valores próximos a cero.

En la figura 5.5 se observa una evolución semejante a la de la figura 5.4. Ya que los valores de la fuerza oscilan creciendo y decreciendo, hasta que finalmente, decrece esa oscilación y alcanza valores próximos a cero cuando han transcurrido 1,9 segundos.



- Par de los eslabones.

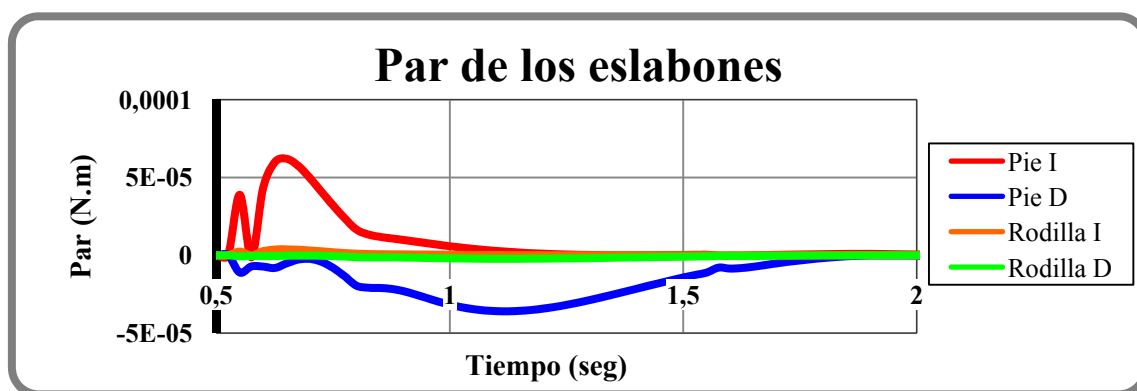


Figura 5.6: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 1).

Inicialmente, se produce una variación grande del Par cuando apenas ha transcurrido un tiempo de 0,525 segundos. Llama la atención de la figura, que el Par ejercido por la Rodilla D tiene unos valores muy reducidos (del orden de  $10^{-6}$  aproximadamente) en comparación con el resto de las partes del robot Pasibot que se estudia. Debido a que el producto de la fuerza por la distancia de la Rodilla D es prácticamente cero. Esto se da porque la fuerza es muy pequeña y apenas se mueve.

También se puede observar, que a partir de un tiempo de 0,525 segundos el valor del Par aumenta (ya sea con valores en positivo en el Pie I y la Rodilla I, y valores negativos en el Pie D) un instante de tiempo muy corto, para luego reducirse bruscamente en otro corto intervalo de tiempo y volver a aumentar de forma considerable. Así hasta reducirse el Par de manera destacada, para que transcurridos aproximadamente 1,9 segundos el valor del Par alcanzar valores muy pequeños y próximos a cero.

Motivo de ello es que cuando el robot Pasibot está en contacto con el suelo, trata de equilibrarse, oscilando en torno a su posición de equilibrio. Cuando el robot Pasibot se encuentra en la posición de equilibrio, no ejerce fuerza en el eje X como se puede ver en la figura 5.3, alcanzando un valor del Par próximos a cero en ese instante.

Los valores del Par máximos son del orden de  $6,21 \cdot 10^{-5}$  N·m en el caso del Pie I, y  $-3,6 \cdot 10^{-5}$  N·m en el caso de Pie D. Como se observan los valores del Par son muy bajos y mayores en los dos pies, cada uno de sentido contrario.

- Fuerza en la Cadera.

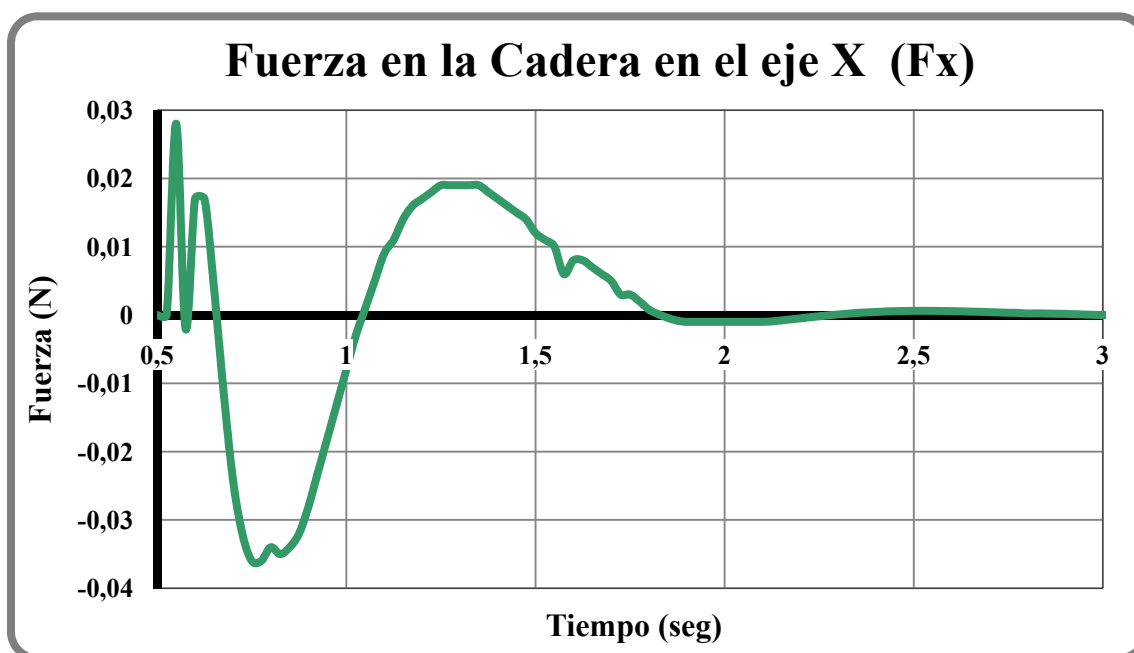


Figura 5.7: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X en función del tiempo (Caso 1).

A partir del instante inicial (aproximadamente  $t=0,525$  segundos) se produce un descenso de la fuerza inapreciable a simple vista ( $F_x=1,33 \cdot 10^{-11}$  N). Para que un instante después la Cadera sufre un incremento de la fuerza en el eje X alcanzando un valor de  $2,8 \cdot 10^{-2}$  N transcurridos 0,55 segundos. Luego se produce un descenso brusco de la fuerza llegando hasta un valor de  $-2 \cdot 10^{-2}$  N en un tiempo de 0,575 segundos. Para luego volver a incrementarse el valor de la fuerza en el eje X de forma considerable.

Como ha ocurrido en varias de las figuras comentadas anteriormente, el valor de la fuerza de la Cadera en el eje X sufre oscilaciones, primero con valores positivos y luego oscilando entorno a un valor de 0 N. Esta oscilación va decreciendo de valor para que, cuando han transcurrido aproximadamente 1,9 segundos, el valor de la fuerza de la Cadera en el eje X alcance valores muy próximos a cero Newton.

Los incrementos y decrementos del valor de la fuerza en el eje X en periodos tan cortos de tiempo son debidos a que el robot Pasibot está tratando de equilibrarse respecto a su punto de equilibrio. Hasta que finalmente llega a ese punto de equilibrio y la fuerza tiende a cero con valores muy próximos.

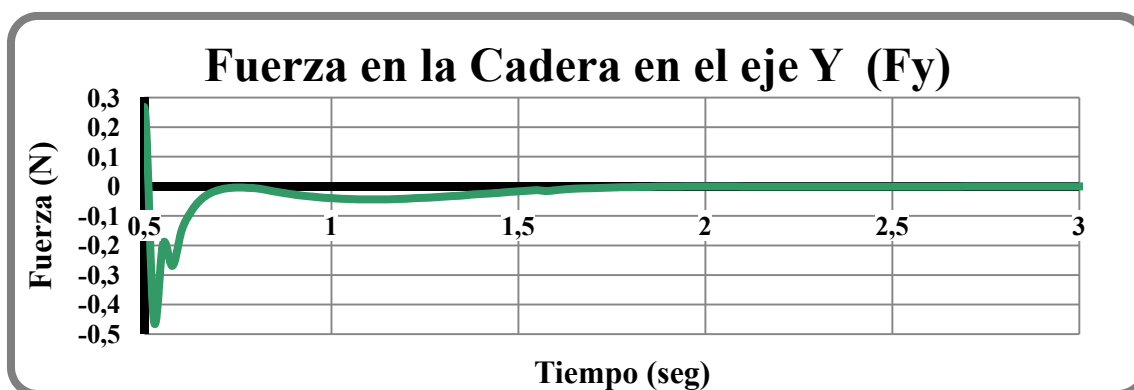


Figura 5.8: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje Y en función del tiempo (Caso 1).

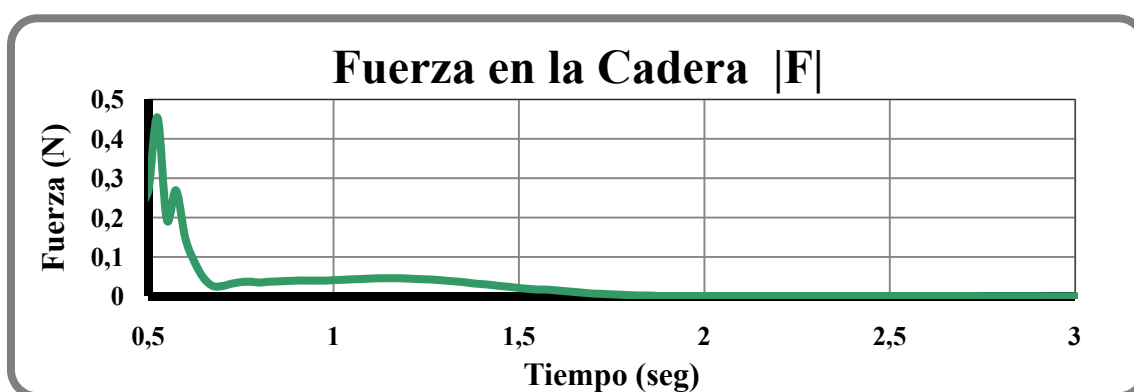


Figura 5.9: Evolución del módulo de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 1).

En la figura 5.8, en el instante inicial ( $t=0,5$  segundos) la Cadera tiene una fuerza  $F_y$  de valor 0,266 N. Después se produce un descenso brusco del valor de la fuerza alcanzando valores negativos, con un valor máximo de -0,454 N cuando han transcurrido 0,525 segundos. El valor de la fuerza en el eje Y oscila en valores negativos para alcanzar unos valores próximos a cero Newton cuando han pasado apenas 1,9 segundos.

La figura 5.9 viene influenciada por la figura 5.7 y 5.8. Se observa que la evolución del módulo de la fuerza de la Cadera es semejante a la de la fuerza en el eje Y solo que con valores positivos en todo instante de tiempo.

Esta evolución de la fuerza, como se ha explicado anteriormente, se debe al ligero movimiento que realiza la Cadera del robot Pasibot en torno a su posición de equilibrio, para equilibrarse hasta que finalmente se detiene cuando han transcurrido 1,9 segundos.

- Par de la Cadera.

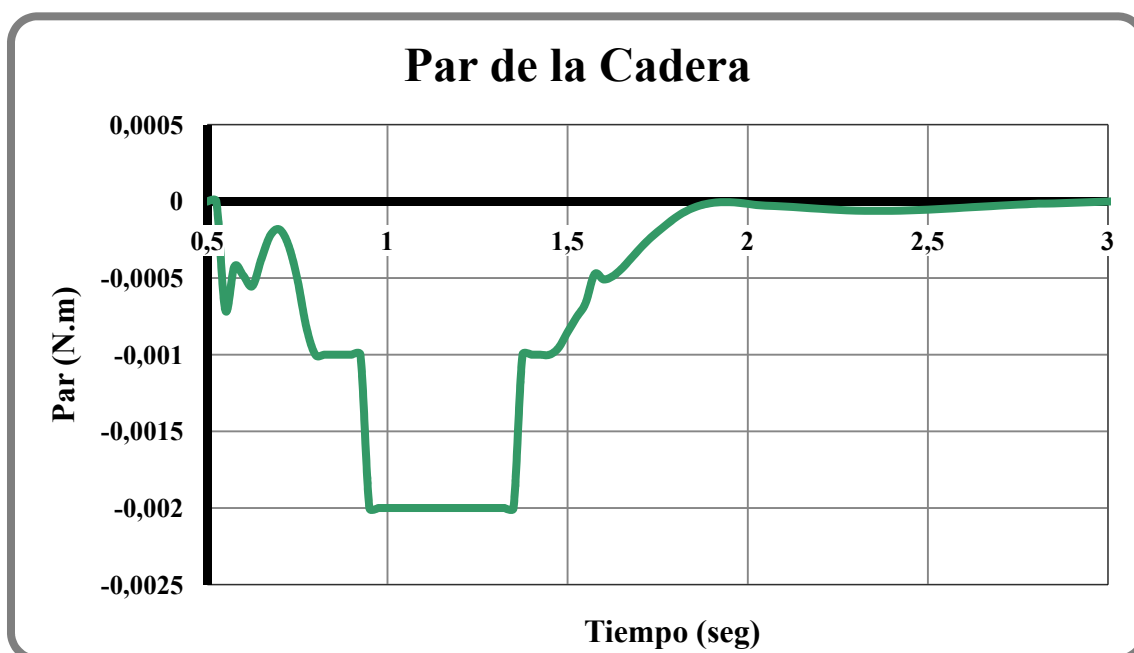


Figura 5.10: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 1).

Inicialmente el Par tiene un valor próximo a cero (del orden de  $10^{-13}$ ). Transcurridos 0,525 segundos el descenso del valor del Par es considerable hasta alcanzar un valor de  $-7,08 \cdot 10^{-4}$  N·m cuando han transcurrido 0,55 segundos. Después el valor del Par de la Cadera tiende a cero para luego volver a aumentar oscilando.

Destaca sobre la figura que desde que el tiempo alcanza un valor de 0,95 segundos hasta que llega a un tiempo de 1,35 segundos el valor del Par no varía y tiene un valor de  $-2,00 \cdot 10^{-3}$  N·m.

Transcurrido dicho intervalo, el valor del Par se reduce aproximándose a cero, hasta que alcanza un valor cercano a cero antes de llegar a los dos segundos (aproximadamente 1,9 segundos). Después sufre un ligero aumento del Par negativo para finalmente aproximarse a valores muy pequeños que se asemejan a 0 N·m.

La escala inicial de estudio son 10 segundos pero se ha reducido al escala lo suficiente como para ver con claridad la evolución del Par. En este caso se ha reducido a 3 segundos porque el valor del Par transcurrido ese tiempo alcanza valores muy próximos a cero y no varían.

### **Conclusiones del Caso 1.**

En este caso, las mayores fuerzas ( las fuerzas totales que incluyen las reacciones y las fuerzas gravitatorias) las sufren los dos pies (Pie I y Pie D) del robot Pasibot cuando realiza el movimiento de equilibrio. En menor medida son las fuerzas de las rodillas.

Las fuerzas que sufre la Cadera tienen valores cercanos a los que sufren los pies del robot Pasibot. Pero aún así, sigue siendo mejor separar dichos estudios en diferentes figuras para ver más claramente la evolución.

Dado que se da una velocidad nula constante al Motor, para realizar el movimiento del robot Pasibot en este caso, la aceleración de rotación debe ser nula (ya que la aceleración es la derivada de la velocidad).

### 2º. Caso 2: Robot Pasibot parado y el paso iniciado.

En este segundo caso, la velocidad que tiene el Motor siguen siendo de 0 radianes por segundo. El robot Pasibot sigue estando inicialmente a una altura de 0,1 metros de altura sobre la pieza que representa el suelo. Pero a diferencia del caso anterior en este caso los pies no están a la misma altura sino que un pie esta encima de otro, es decir, es como si el robot Pasibot hubiera realizado medio paso.

El movimiento que realiza el robot Pasibot en este caso es el siguiente: primero por la fuerza de la gravedad el robot Pasibot cae desde una altura de 0,1 metros y entra en contacto con el suelo, luego cuando entra en contacto con el suelo, el robot Pasibot termina por completar el paso con el pie que estaba levantado (en este caso el pie levantado es el pie izquierdo de color rojo), una vez que tienen los dos pies en contacto con el suelo, el robot Pasibot comienza a ejecutar un segundo paso por la inercia que recibe del primer paso, pero no tiene la suficiente inercia para completar un segundo paso y vuelve hacia atrás el pie derecho. Finalmente el robot Pasibot oscila en torno a su posición de equilibrio hasta que termina por equilibrarse y cesa su movimiento.

En el análisis de los resultados se omitirá el intervalo de tiempo en el que el robot Pasibot cae desde la altura inicial. El instante inicial se considerará cuando la pierna derecha (de color azul) este apoyada en el suelo. Ese instante inicial se considerará cuando han transcurrido 0,475 segundos desde la posición inicial. La explicación de la omisión de ese intervalo de tiempo es que en el modelo real no se dejara caer el robot Pasibot desde una altura, sino que se dejara completamente en contacto con el suelo desde el instante inicial.

La captura de movimientos del robot en este caso ya fue reflejada en el capítulo 4 (figura 4.10).

A continuación se ha realizado un análisis dinámico igual que se ha realizado en el caso 1, exportando los datos obtenidos con Working Model 2D a Microsoft Excel.

- Fuerza en los eslabones.

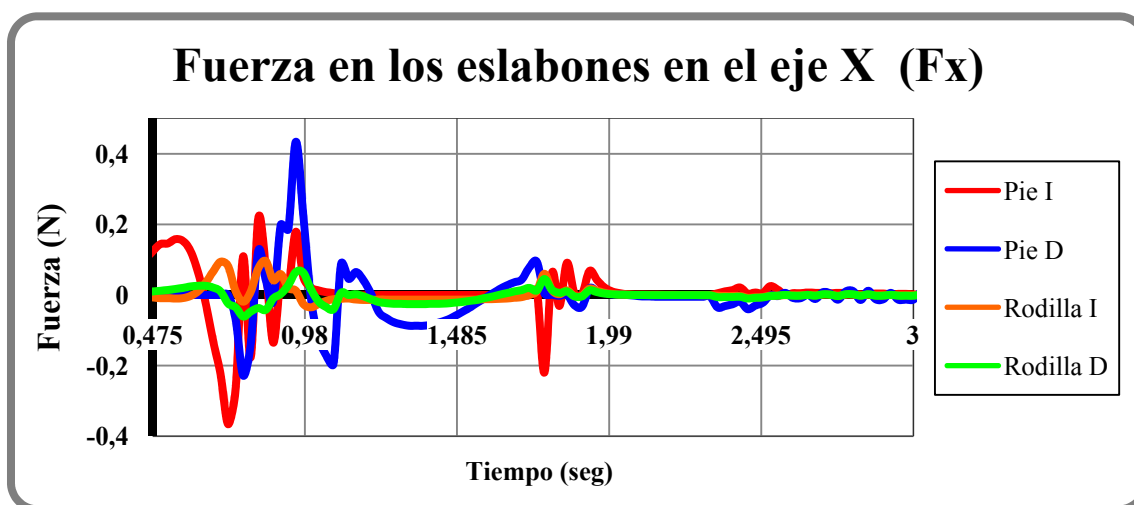


Figura 5.11: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 2).

Inicialmente, debido a que la pierna izquierda del robot Pasibot comienza a bajar para completar el primer paso, la fuerza en el eje X del Pie I aumenta ligeramente (alcanzando un valor máximo positivo de 0,158 N en un tiempo de 0,55 segundos). Después se reduce el valor de esta fuerza alcanzando un valor máximo negativo. Oscilando finalmente en torno a una fuerza nula para llegar a ella.

En la pierna derecha del robot Pasibot, cuando realiza el primer paso, la fuerza del Pie D es nula. Cuando el robot Pasibot ejecuta un segundo paso, la fuerza del Pie D aumenta alcanzando 0,434 N cuando han transcurrido 0,95 segundos.

En las rodillas del robot Pasibot, las fuerzas de ambas son considerablemente inferiores a la de los pies del robot Pasibot. En cuanto a los valores, la fuerza máxima positiva de la Rodilla I es 0,096 N en 0,85 segundos y la fuerza máxima negativa es -0,035 N en 1 segundo. En la Rodilla D, la fuerza máxima positiva es de 0,063 N en 0,975 segundos y la fuerza máxima negativa es -0,061 N en 0,775 segundos.

Se puede ver que las rodillas del robot Pasibot alcanza su mayor valor de fuerza negativa cuando está realizando el segundo paso. Destaca además que en dos intervalos de tiempo (el primero desde 1,6 hasta 2,075 segundos y el segundo desde 2,235 hasta 2,6 segundos) las fuerzas de los pies y las rodillas del robot Pasibot oscilan en torno a 0 N, porque el robot Pasibot esta oscilando en torno a su posición de equilibrio.

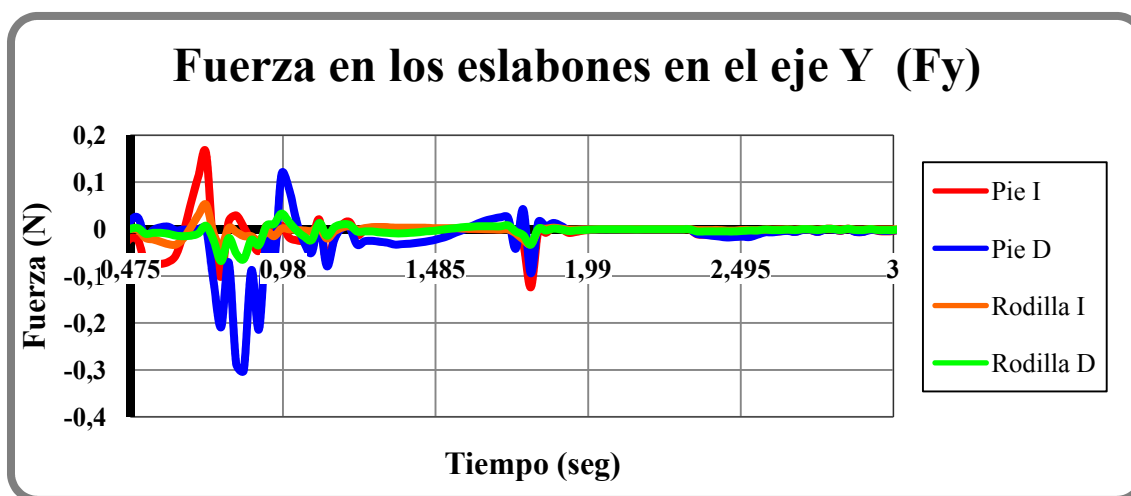


Figura 5.12: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 2).

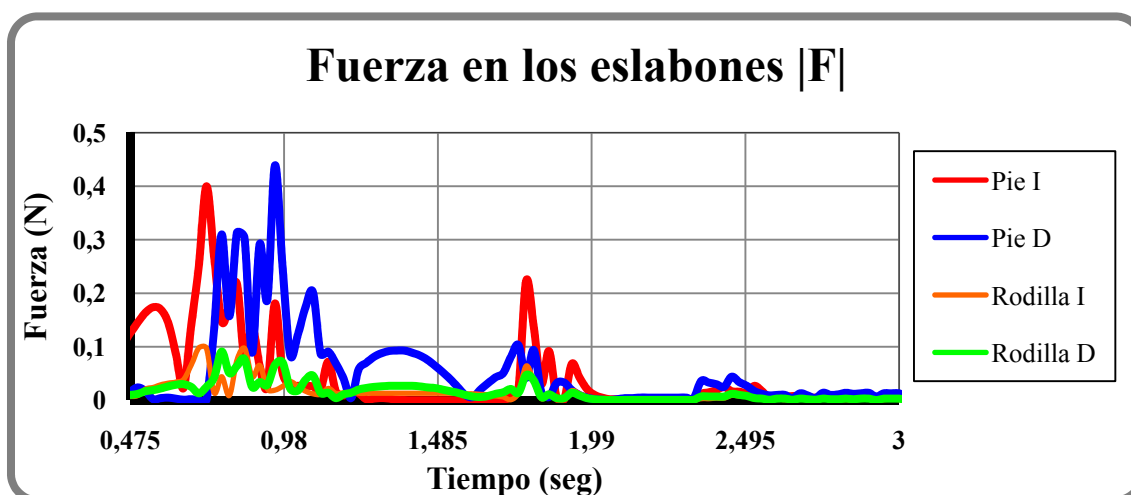


Figura 5.13: Evolución del módulo de la fuerza en función del tiempo (Caso 2).

En la figura 5.12 se puede observar que, cuando el robot Pasibot completa el primer paso, se produce un aumento de la fuerza positiva en el Pie I. En el periodo de tiempo en que ha bajado la pierna izquierda y no se ha levantado la pierna derecha para el segundo paso (los dos pies en contacto con el suelo), el Pie D alcanza fuerzas negativas, para luego aumentar hasta fuerzas positivas cuando comienza a realizar el segundo paso. Después, al no completar el segundo paso, las fuerzas tienden a cero (excepto en el intervalo que se mueve el robot Pasibot para equilibrarse).

En la figura 5.13, cuando el robot Pasibot completa el primer paso, se produce el incremento del módulo de la fuerza, ocurriendo lo mismo cuando el robot Pasibot inicia el segundo paso, que sufre un incremento de la fuerza en este caso del Pie D.



- Par de los eslabones.

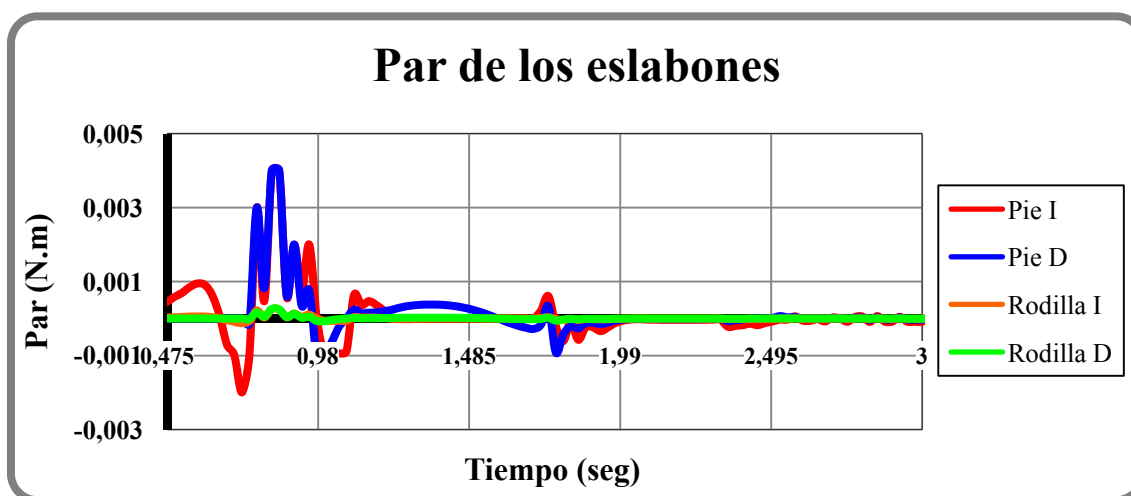


Figura 5.14: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 2).

Desde el instante inicial ( $t=0,475$ ) (completando el primer paso), el Par del Pie I aumenta ligeramente ( $0,001 \text{ N}\cdot\text{m}$ ). Según va llegando el Pie I al suelo, el Par alcanza valores negativos (Par máximo negativo de  $-0,002 \text{ N}\cdot\text{m}$  en  $0,725$  segundos).

Cuando el robot Pasibot tiene los dos pies en el suelo, la evolución del Par del Pie I y del Pie D es semejante (alcanza  $0,004 \text{ N}\cdot\text{m}$  en  $0,825$  segundos). Cuando el robot Pasibot comienza el segundo paso, el Par del Pie I y del Pie D sufre una evolución hacia valores negativos. La evolución de ambos es semejantes ( $-0,001 \text{ N}\cdot\text{m}$  en  $1$  segundo).

Se puede destacar que la evolución del Par de la Rodilla D es cercana a cero (del orden de  $10^{-6}$ ). Se produce un ligero incremento entre el intervalo de tiempo desde  $0,8$  hasta  $1,05$  segundos (cuando el robot Pasibot ha completado el primer paso y todavía no está ejecutando el segundo), el Par que alcanza en dicho intervalo es de  $2,47 \cdot 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$ .

El Par de la Rodilla I es el mismo que la evolución del Par de la Rodilla D. Por último indicar dos cosas, la primera es que cuando el robot Pasibot no puede realizar el segundo paso, el Par se reduce considerablemente hasta valores cercanos a cero. Lo segundo es que en el periodo comprendido entre  $1,75$  y  $2$  segundos se produce un incremento del Par, este incremento viene motivado por el movimiento que produce el robot Pasibot para equilibrarse en torno a su posición de equilibrio, esto produce unas reacciones que se ejercen sobre el suelo incrementando el Par.

- Fuerza en la Cadera.

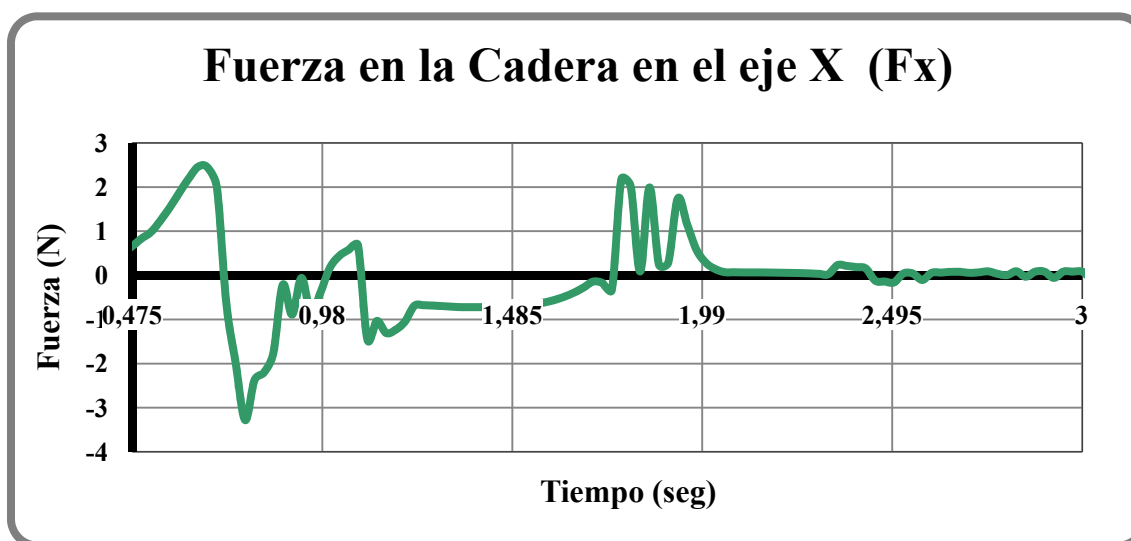


Figura 5.15: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X en función del tiempo (Caso 2).

La Cadera, desde el instante inicial ( $t=0,475$ ) con una fuerza de 0,658 N sufre un incremento alcanzando un máximo de 2,44 N en un tiempo de 0,65 segundos (instante en el que se está desplazando la Cadera en el eje X, como se puede observar en la figura 4.11). Este aumento de la fuerza es debido al movimiento del robot Pasibot, en el cual el Pie I está avanzando y descendiendo para completar un primer paso que estaba iniciado en su posición inicial. Si se observa la figura 4.11, en la posición en el eje X de la Cadera, ese instante de tiempo corresponde a la máxima pendiente que sufre la curva de la evolución de la posición en el eje X del Centro de Gravedad de la Cadera.

Después la fuerza de la Cadera en el eje X alcanza, con una pendiente negativa, una fuerza negativa con un valor máximo de -3,28 N cuando han pasado 0,775 segundos (en la figura 4.11, este instante de tiempo corresponde al punto donde cambia la pendiente de la curva de la evolución de la posición del CDG de la Cadera en el eje X). Tras alcanzar este mínimo, la fuerza toma unos valores positivos cuando el robot Pasibot comienza a realizar el segundo paso.

Finalmente, al no poder realizar el robot Pasibot el segundo paso (porque no dispone de la inercia suficiente), la fuerza en el eje X de la Cadera oscila en torno a valores próximos a cero, para alcanzar una fuerza  $F_x$  de cero Newton cuando han transcurrido aproximadamente 3 segundos.

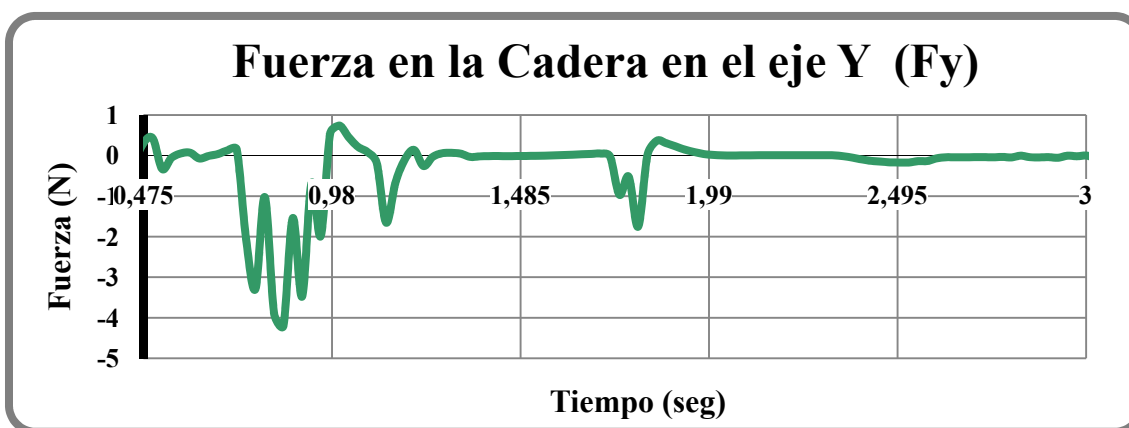


Figura 5.16: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje Y en función del tiempo (Caso 2).

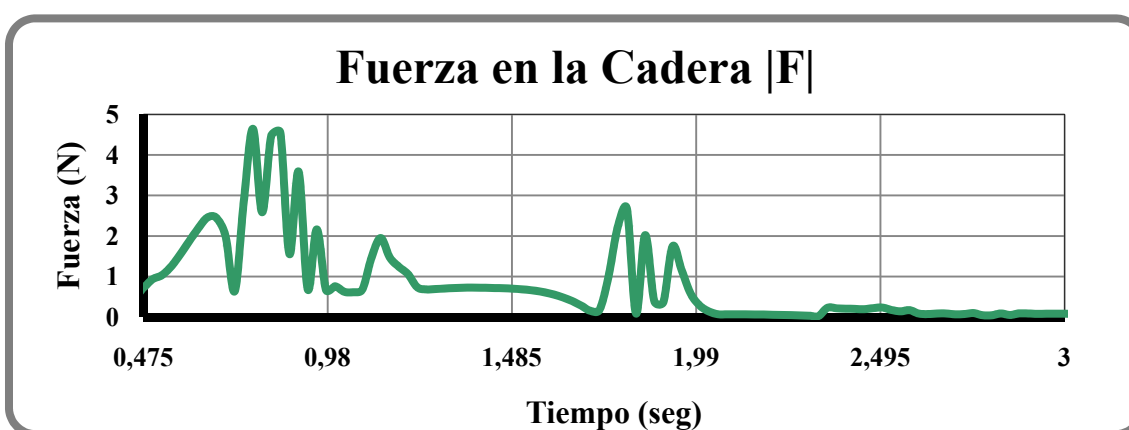
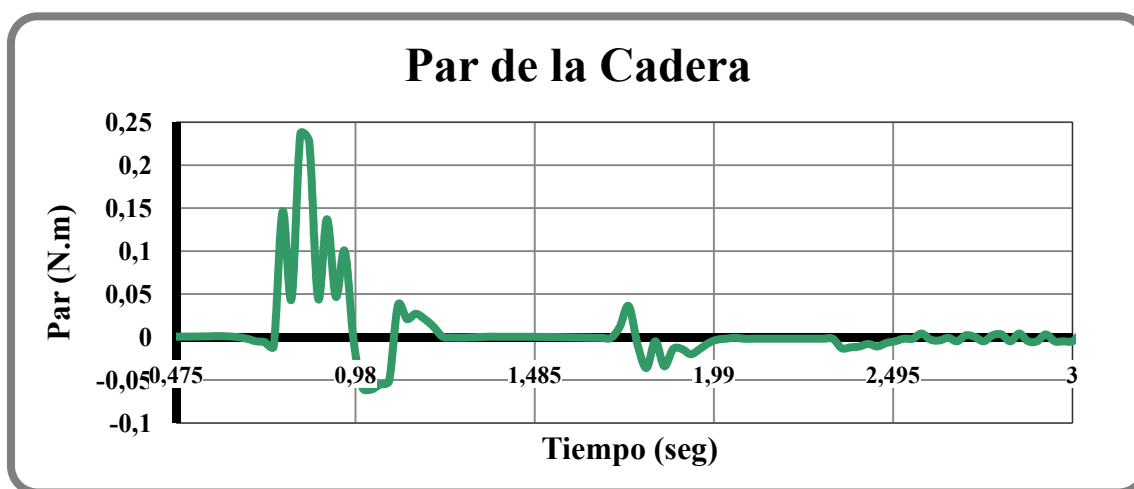


Figura 5.17: Evolución del módulo de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 2).

En la figura 5.16, desde el instante inicial ( $t=0,475$  segundos) hasta que el robot Pasibot completa el primer paso, la fuerza de la Cadera en el eje Y tiene valores próximos a cero. Cuando el robot Pasibot tiene los dos pies en el suelo, la fuerza de la Cadera aumenta hacia valores negativos, alcanzando un valor máximo de  $-4,196$  N en  $0,85$  segundos. Cuando el Robot Pasibot comienza a ejecutar el segundo paso, la fuerza en el eje Y tiene una pendiente positiva, para que después tenga valores próximos a  $0$  N, excepto en un intervalo que sufre una ligera variación.

En la figura 5.17, cuando el robot Pasibot está completando el primer paso, la fuerza de la Cadera aumenta para luego descender. Es cuando tiene los dos pies en el suelo, cuando el módulo de la fuerza de la Cadera alcanza el máximo valor ( $4,645$  N para un tiempo de  $0,775$  segundos). Después, según el robot Pasibot deja de moverse, la evolución de la fuerza se aproxima a cero Newton.

- Par de la Cadera.



**Figura 5.18: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 2).**

En esta figura destaca que, desde el instante inicial ( $t=0,475$  segundos) hasta un tiempo aproximado a 0,7 segundos, el valor del Par de la Cadera es muy bajo (del orden de  $10^{-4}$  N·m). En ese instante de tiempo ( $t=0,7$  segundos) se produce un ligero descenso del Par para luego incrementarse de manera considerable. Produciéndose aumentos y descensos del Par en periodos muy cortos de tiempo, oscilando. En estas subidas y bajadas del Par, alcanzan un valor máximo de 0,236 N·m cuando han transcurrido 0,825 segundos. Estas variaciones del Par corresponden al movimiento del robot Pasibot cuando ha completado el primer paso y tiene los dos pies en el suelo.

Si se sigue observando la figura, al terminar las oscilaciones comentadas anteriormente, el valor del Par desciende de manera considerable alcanzando un valor de -0,059 N·m cuando ha transcurrido 1 segundo. Esto es debido a que el robot Pasibot trata de dar un segundo paso levantando la pierna derecha, pero al no tener la suficiente inercia para completarlo vuelve hacia atrás. Eso se puede observar en el gráfico porque el Par de la Cadera, cuando el robot Pasibot baja su pierna derecha a la posición original, vuelve a tender a cero.

Después se producen unas ligeras oscilaciones cuando el tiempo está llegando a dos segundos debido al movimiento que realiza el robot Pasibot para equilibrarse en torno a su posición de equilibrio. Finalmente el valor del Par de la Cadera tiende a cero debido a que el robot Pasibot no se mueve.

## **Conclusiones del Caso 2.**

En este segundo caso, a diferencia del primer caso, las mayores fuerzas que sufre el robot Pasibot (reacciones más fuerzas gravitatorias) se dan en la Cadera (con valores que van desde 4,5 N hasta -4 N dando valores aproximativos).

Siendo en segundo lugar los pies del robot Pasibot los que se ven sometidos a mayores fueras (pero los valores que alcanzan son mucho menores que en la Cadera, con valores entre -0,4 y 0,4 N).

Con el Par ocurre lo mismo que con las fuerzas, siendo bastante mayores los de la Cadera que los de los pies y las rodillas del robot Pasibot.

Al igual que en el primer caso no se señala ningún resultado del Motor, porque la velocidad inicial está fijada antes de iniciar el movimiento y tiene una velocidad constante a lo largo de todo el movimiento (una velocidad nula). Por ello la aceleración de rotación del Motor es nula.

**3º. Caso 3: Robot Pasibot en movimiento realizando un paso completo considerando un pie anclado al suelo.**

En este caso se considerará como posición inicial del robot Pasibot con los dos pies apoyados en el suelo (la distancia que existe entre los dos pies y el rectángulo que actúa de suelo se puede considerar prácticamente despreciable)

Se han obtenido los resultados de la misma simulación que el caso 3 del capítulo 4. La captura de imágenes del movimiento se puede observar en la figura 4.21.

El movimiento que realiza el robot Pasibot en este caso es muy sencillo, con el Pie D anclado y el Pie I apoyado en el suelo, el robot Pasibot, mediante la fuerza del Motor que provoca el movimiento de la Manivela, hace ejecutar el movimiento de levantamiento de la pierna izquierda del robot Pasibot para completar un paso hasta volver a apoyar el Pie I en el suelo al completar el paso.

A continuación se expresan las figuras con los datos exportados del programa WM 2D a Microsoft Excel sobre el estudio dinámico.

- Fuerza en los eslabones.

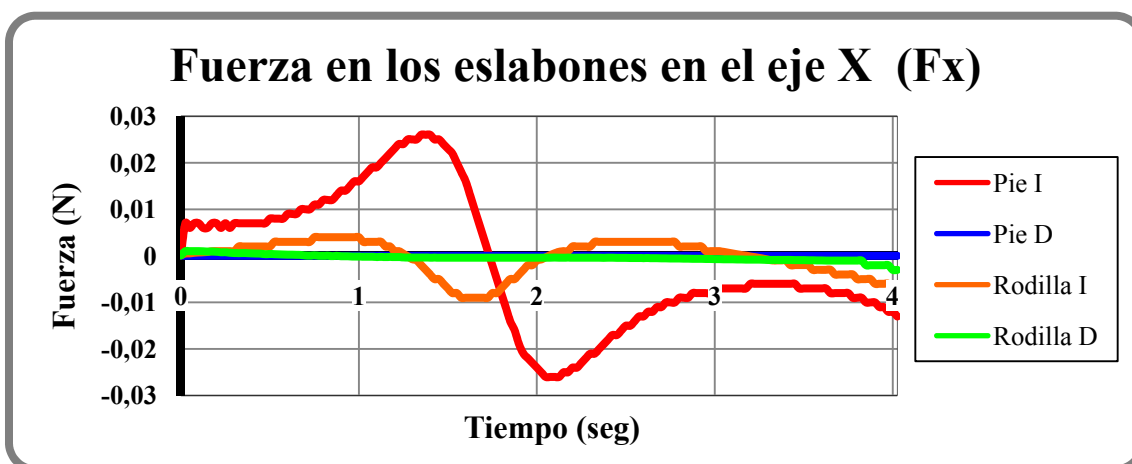


Figura 5.19: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 3).

La fuerza que realiza el Pie D es nula en cualquier instante de tiempo, porque el Pie D está anclado al suelo y no se mueve, por ello no realiza ninguna fuerza.

La fuerza de la Rodilla D tiene un valor ligeramente superior a cero en el instante inicial. Luego rápidamente tiende a cero y finalmente varía cuando está terminado el paso.

La fuerza que ejerce la Rodilla I toma valores negativos en el instante inicial, que van aumentando según comienza el paso. Cuando la Rodilla I alcanza la posición más alta, el valor de la fuerza que ejerce toma un valor máximo de signo negativo, que en este caso es de -0,009 N, luego, el valor de la fuerza de la Rodilla I cambia la tendencia para alcanzar valores positivos en el intervalo de tiempo entre 2 y 3 segundos.

La fuerza del Pie I en el instante inicial alcanza valores próximos a cero Newton, nada más comenzar el paso, se produce un incremento de la fuerza que, según se va levantando la pierna izquierda, más va aumentando la fuerza. Cuando el Pie I está alcanzando el punto más alto, la fuerza alcanzada es máxima, cuyo valor es 0,25 N en 1,425 segundos. Cuando el pie está descendiendo, la fuerza ejercida por el Pie I también descende, alcanzando valores negativos, que como máximos son de -0,26 N en 2,125 segundos. Al alcanzar este mínimo, se produce un incremento de la fuerza y finalmente cuando el robot Pasibot ha apoyado el pie izquierdo en el suelo, se produce otro descenso de la fuerza en el eje X como se puede ver en la figura.

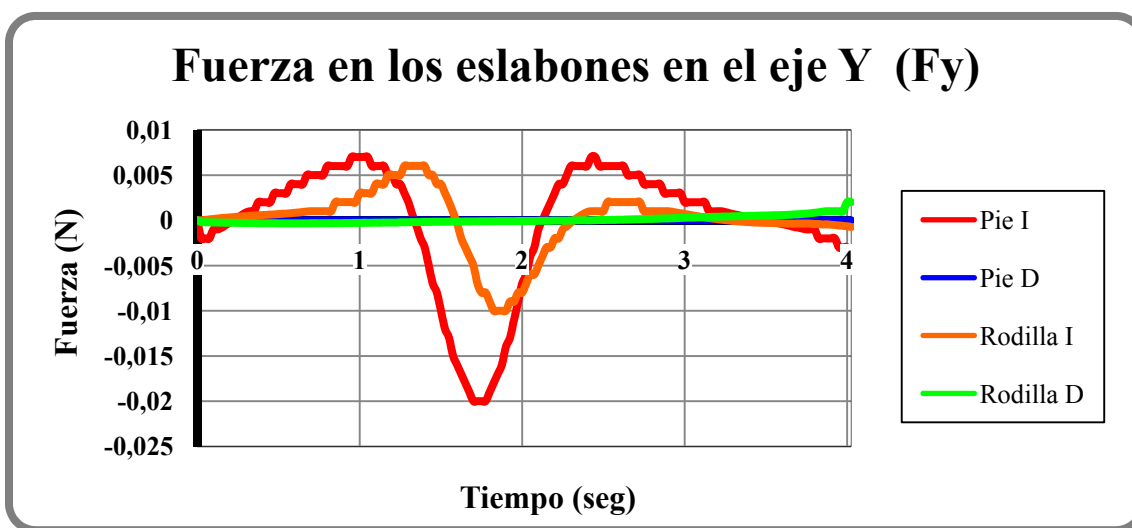


Figura 5.20: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).

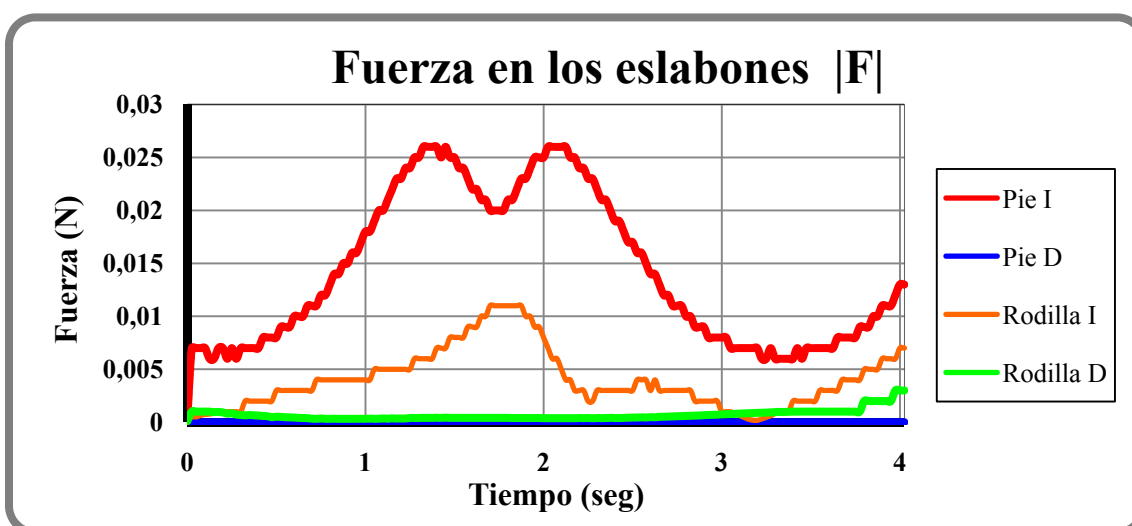


Figura 5.21: Evolución del módulo de la fuerza en función del tiempo (Caso 3).

Se observa como la parte del robot Pasibot que mayor fuerza alcanza tanto en el eje vertical como en el módulo es el Pie I que es el que realiza el paso. En el eje vertical la fuerza  $F_y$  máxima es negativa ( $F_y = -0,02\text{N}$ ) y en el caso del módulo de la fuerza, el máximo es de valor positivo y próximo a  $0,026\text{ N}$  en el intervalo de tiempo en el que el pie está en el punto más alto.

La segunda pieza del robot Pasibot que alcanza la mayor fuerza es lógicamente perteneciente a la pierna izquierda, que es la que realiza el paso y es la Rodilla I, que alcanza valores ligeramente superiores a  $0,01\text{ N}$ , correspondiente al punto en el que la rodilla está más alta.



- Par de los eslabones.



Figura 5.22: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 3).

Destaca en primer lugar que como la fuerza ejercida por el Pie D y la Rodilla D tiene valores de 0 N o próximos a cero, el Par realizado por estas partes son también 0 N·m o próximos a dicho valor.

Si se analiza la evolución del Par de la Rodilla I, se observa que realiza un Par próximo a cero en todo instante de tiempo aunque varía ligeramente cuando la barra denominada Rodilla I está en el punto más alto (cuando el robot Pasibot está ejecutando el paso con la pierna izquierda).

La evolución del Par que más interesa es la del Pie I que se observa cómo, cuando la pierna izquierda está empezando a ejecutar el paso, el Par tiene una pendiente negativa y alcanza un valor negativo máximo bajo ( $-7.99 \cdot 10^{-5}$  N·m cuando el marcador de tiempo marca 1,025 segundos). Nada más alcanzar ese valor, se produce un incremento del Par, que alcanza su valor máximo cuando el Pie I está en su punto más alto, cuando tiene la mitad del paso completado (obteniendo valores máximos de  $2,45 \cdot 10^{-5}$  N·m cuando han transcurrido 1,75 segundos). Después se produce un descenso considerable, alcanzando un mínimo negativo próximo al que se ha comentado antes. Para luego, cuando acaba de completar el primer paso, producirse un incremento del Par alcanzando valores positivos.

- Fuerza en la Cadera.

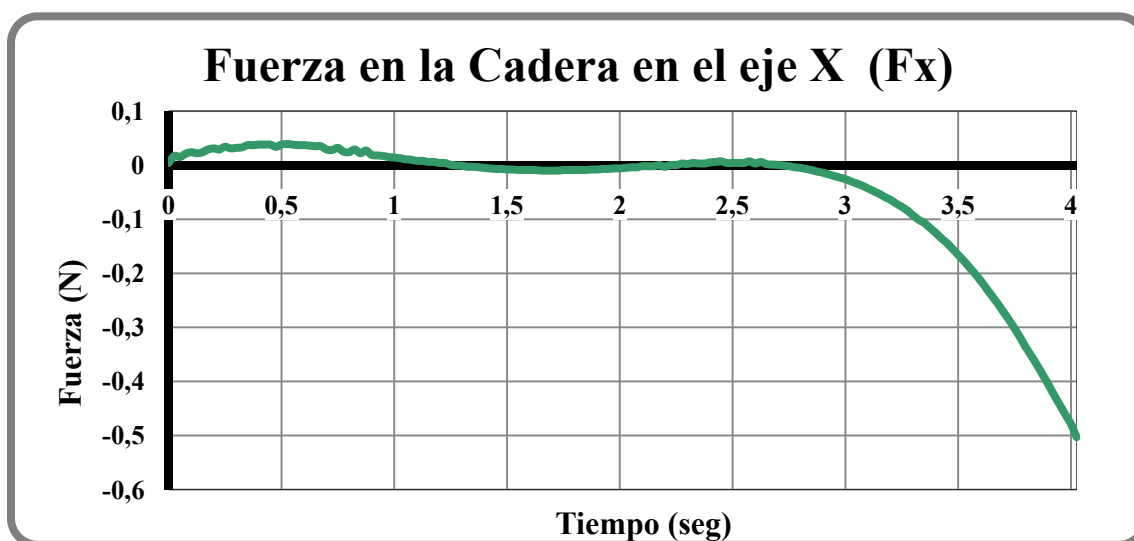


Figura 5.23: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X en función del tiempo (Caso 3).

La figura 5.23 refleja la evolución de la fuerza que ejerce la Cadera en el eje X en función del tiempo cuando el robot Pasibot realiza un paso con la pierna izquierda y la pierna derecha anclada al suelo.

Primero se observa un ligero incremento de valores muy bajos (alcanza un valor de 0,038 N cuando han transcurrido 0,5 segundos) que en el movimiento del robot Pasibot corresponde al instante en el que está levantando la pierna izquierda para realizar el paso.

Cuando la pierna izquierda va alcanzando su posición más alta la fuerza que realiza la Cadera tiene valores próximos a cero pero de valores negativos.

La fuerza que ejerce la Cadera en el eje X cuando la pierna izquierda completa el paso y apoya el Pie I en el suelo tiene valores próximos a cero.

Después, como el Pie D está anclado al suelo, el Pie I sigue moviéndose ligeramente y produce un ligero movimiento en la Cadera. Este movimiento produce, como se puede observar en la figura, una gran variación de la fuerza de la Cadera en el eje X, que coincide con el final del tiempo de estudio. Los valores que se llegan a alcanzar cuando acaba el tiempo de estudio, es decir, para un valor del tiempo de 4,025 segundos, son de -0,503 Newton.

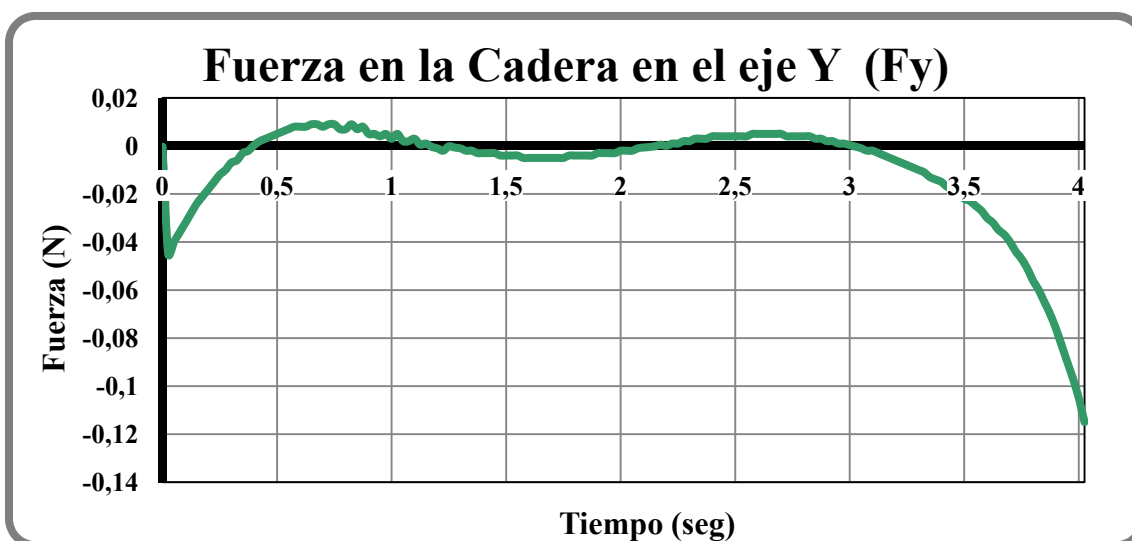


Figura 5.24: Evolución de la fuerza de la Cadera en el eje Y en función del tiempo (Caso 3).

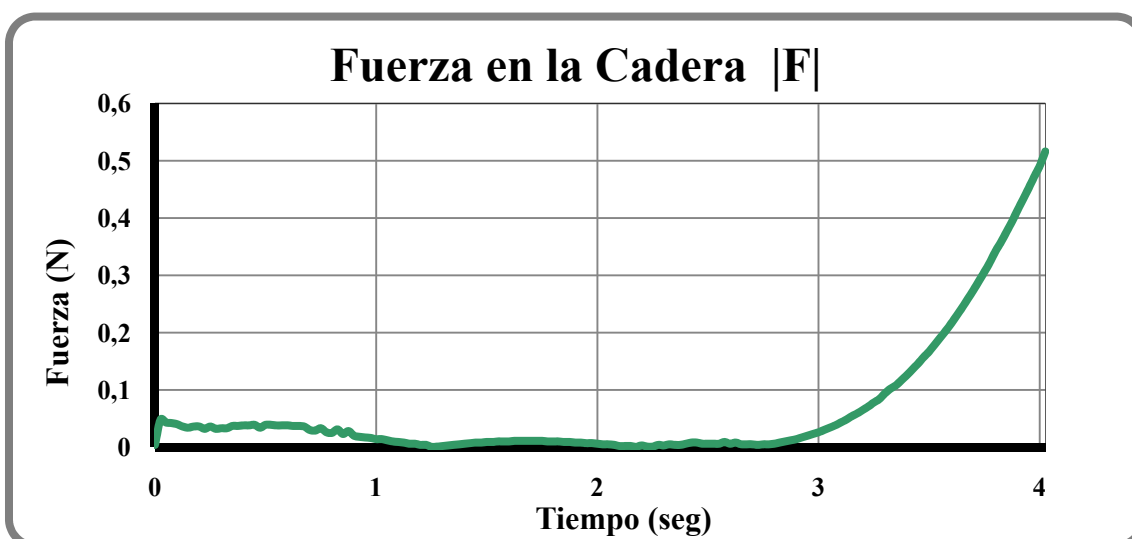


Figura 5.25: Evolución del módulo de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 3).

Las figuras 5.24 y 5.25 muestran la evolución que tiene la fuerza de la Cadera en el eje Y y el módulo de la fuerza en la Cadera en función del tiempo.

Se ve que la evolución de la fuerza de la Cadera en el eje X es parecida a la fuerza en el eje Y, salvo un intervalo de tiempo inicial en el que la fuerza  $F_y$  alcanza valores negativos ( $F_y = -0,45$  N). Al final el descenso de la fuerza en el eje Y de la Cadera es menor que la de la figura 5.23 ( $F_y = -0,115$  N).

El módulo de la fuerza de la Cadera es una consecuencia de la fuerza en el eje X y la fuerza en el eje Y por eso tiene esa evolución.

- Par de la Cadera.

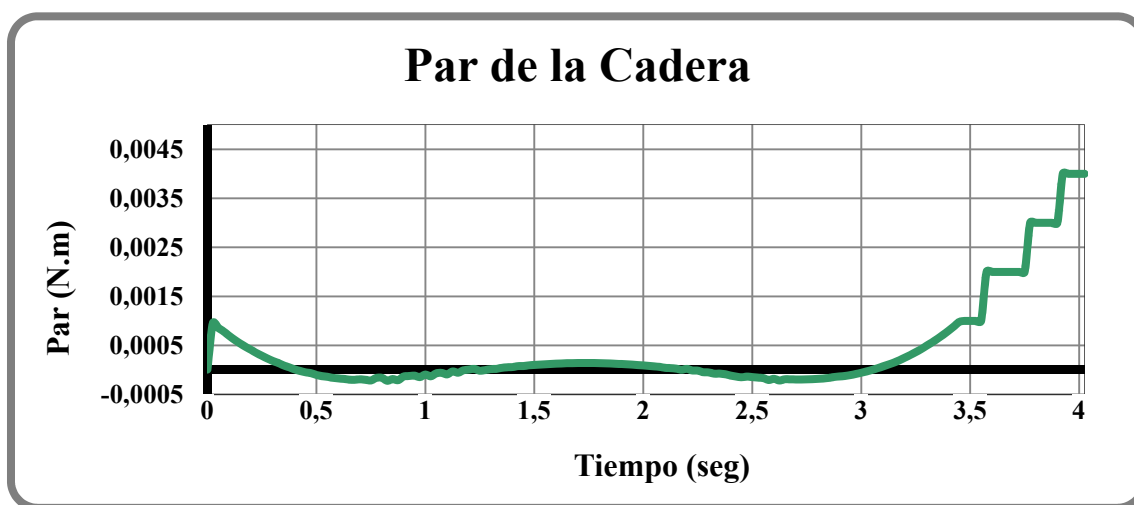


Figura 5.26: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 3).

Inicialmente la magnitud del Par tiene valores cercanos a cero (en el instante inicial para un tiempo de cero segundos el Par tiene un valor de  $8,70 \cdot 10^{-6}$  N·m). Nada más comenzar el paso, sufre un considerable incremento del Par, alcanzando valores de  $9,56 \cdot 10^{-4}$  N·m cuando han transcurrido 0,025 segundos.

Cuando el robot Pasibot se dispone a iniciar el paso, se va reduciendo el valor del Par alcanzando valores negativos próximos a cero. Según se va levantando la pierna izquierda, se incrementa el valor del Par con valores próximos a cero pero positivos, alcanzando un valor máximo de  $1,42 \cdot 10^{-4}$  N·m en 1,725 segundos.

En el momento en el que la pierna esta en el punto más alto y comienza a bajar la pierna, el valor del Par comienza a bajar, para que, cuando la pierna izquierda este totalmente apoyada en el suelo el valor del Par alcanza valores negativos.

Cuando el robot Pasibot ha terminado de completar el primer paso tendría que comenzar a dar el segundo paso. Pero como tiene la pierna derecha anclada con el rectángulo que ejerce de suelo y no puede levantarse para completar el segundo paso, la pierna izquierda se mueve ligeramente hacia atrás y por ello la Cadera se mueve.

Por ese movimiento de la Cadera, se produce un incremento considerable del Par, alcanzando valores de  $4,00 \cdot 10^{-3}$  N·m en 4,025 segundos.

- Par del Motor.

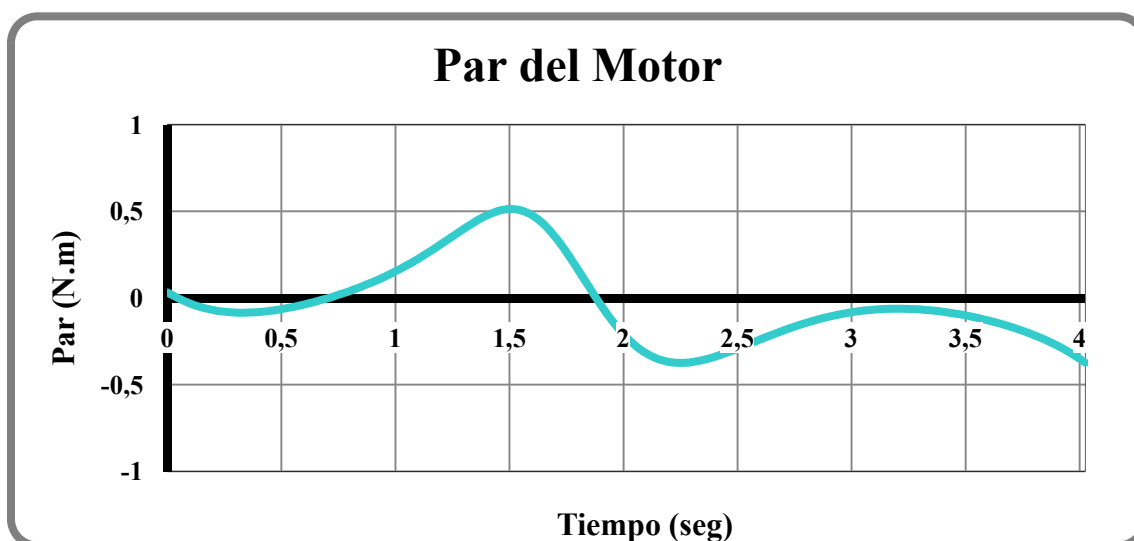


Figura 5.27: Evolución del Par del Motor en función del tiempo (Caso 3).

El valor del Par en el instante inicial es de 0,032 N·m (muy próximo a cero). Después toma valores ligeramente negativos para que, cuando se empieza a mover el Pie I, alcance (con una pendiente positiva) un Par máximo positivo de 0,513 N·m cuando han transcurrido 1,5 segundos (que es cuando el robot Pasibot está levantando el pie izquierdo en su punto medio de ascenso).

Después de alcanzar este máximo, se produce un descenso brusco de los valores del Par, alcanzando valores negativos cuando el robot Pasibot está levantando el pie y llegando al punto más alto.

Cuando el Pie I comienza a bajar, la pendiente del Par es positiva pero no llega a alcanzar valores positivos. Una vez que entra en contacto con el suelo el valor del Par es próximo a cero, con un Par de -0,062 N·m.

Finalmente cuando el robot Pasibot ha completado el paso y tendría que realizar un segundo paso, como no puede porque el robot Pasibot tiene anclado el pie derecho, es obligado a hacer retroceder el pie izquierdo ligeramente. Esto produce variaciones considerables como se ha ido viendo en figuras anteriores y que en caso del Par se produce un descenso considerable con valores negativos. El valor que llega a alcanzar es de -0,373 Newton por metro.

- Potencia del Motor.

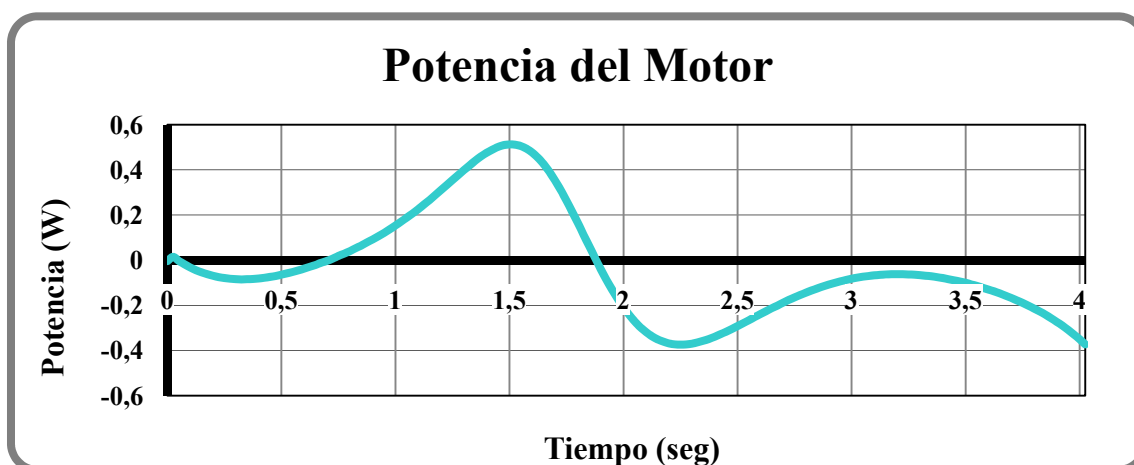


Figura 5.28: Evolución de la potencia del Motor en función del tiempo (Caso 3).

En el instante inicial el Motor transmite una potencia de -0,004 Watios. Luego sube ligeramente para descender de forma considerable tomando valores negativos.

Cuando el robot Pasibot empieza a moverse levantando la pierna izquierda, el valor de la potencia que transmite el Motor tiene una pendiente positiva (Potencia de 0,513 Watios en 1,5 segundos). En el movimiento del robot Pasibot, se corresponde a la altura media de la posición que asciende el pie izquierdo.

Una vez alcanzado ese máximo, la evolución de la potencia que transmite el Motor toma una pendiente negativa, alcanzando valores mínimos una vez que acaba de pasar el pie izquierdo por su máxima altura. Los valores son aproximadamente de -0,374 Watios cuando el tiempo transcurrido es de 2,25 segundos.

Finalmente, según se va aproximando el pie izquierdo al rectángulo que actúa como suelo, la potencia que transmite el Motor toma una pendiente positiva acercándose los valores de la potencia a cero Watios.

Una vez que el robot Pasibot ha completado el paso, por motivo de que el pie derecho este anclado al suelo y no pueda continuar el robot Pasibot su segundo paso, el robot Pasibot sufre y el pie izquierdo tiene que retroceder ligeramente. Por ello el Motor debe transmitir una potencia de pendiente negativa tomando valores máximos de -0,373 Watios.

### **Conclusiones del Caso 3.**

En el tercer caso la pieza del robot Pasibot que sufre la mayor fuerza (reacciones más fuerzas gravitatorias) es la Cadera, pero con valores más semejantes al Pie I del robot Pasibot. La fuerza que sufre la Rodilla I es mucho menor que la que sufre el Pie I en cualquier instante de tiempo.

Por las características que se le dan al robot Pasibot en este caso (anclar el Pie D) las fuerzas y el Par que se producen en el Pie D y como consecuencia en la Rodilla D son prácticamente nulas en cualquier instante de tiempo.

En cuanto al Par, los valores que alcanza la Cadera son mayores que los del Pie I y a Rodilla I, pero la diferencia de valores no es tan grande como en el segundo caso.

En este caso destaca, que tanto en las fuerzas como en el Par de la Cadera, los máximos se alcanzan cuando el robot Pasibot inicia y finaliza el paso. Mientras que en el Pie I y la Rodilla I los máximos se alcanzan cuando el robot Pasibot está en la mitad del paso, es decir, cuando está alcanzando la posición más alta en el eje Y.

En cuanto al Motor, con la aceleración de rotación ocurre lo mismo que en casos anteriores. La velocidad del Motor es constante (aunque en este caso no es nula a diferencia de los casos anteriores) y por ello la aceleración de rotación debe ser nula a lo largo de todo el movimiento del robot Pasibot (el Working Model debido a la simplificación de la simulación puede dar ciertos valores de la aceleración de rotación pero muy próximos a cero).

### 4º. **Caso 4: Robot Pasibot en movimiento con diferentes dimensiones.**

Por último se analiza un estudio dinámico del robot Pasibot realizando un movimiento de 4 pasos. En este caso las dimensiones y características del robot Pasibot son distintas y ya se indicaron anteriormente, a continuación se nombra cuales son:

- Tabla 4.4: Dimensiones del robot Pasibot utilizado en el caso 4.
- Tabla 4.5: Características técnicas de las piezas del Robot Pasibot del caso 4.

Estas dimensiones son proporcionadas por el grupo MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid.

La diferencia de dimensiones provoca que el robot Pasibot camine sin que el programa Working Model 2D de problemas a la hora de realizar la simulación.

El movimiento que se estudiara será apoyarse en el suelo desde una distancia mínima, y a continuación realizar 4 pasos. La velocidad que se le proporciona al Motor en este caso son de  $-59,296 \text{ }^\circ/\text{s}$  (aproximadamente  $1 \text{ rad/s}$ , el signo negativo se le proporciona para que el robot Pasibot se desplace hacia la derecha). Esta velocidad se ha proporcionado para que el robot Pasibot haga una media de 15 pasos por minuto.

En este caso no se comentaran los valores obtenidos en las figuras ya que las dimensiones no son las del modelo real y no interesan. Lo único por lo que se realiza este caso es para ver la evolución que sufren las partes de más interés, desde el punto de vista dinámico.



- Fuerza en los eslabones.

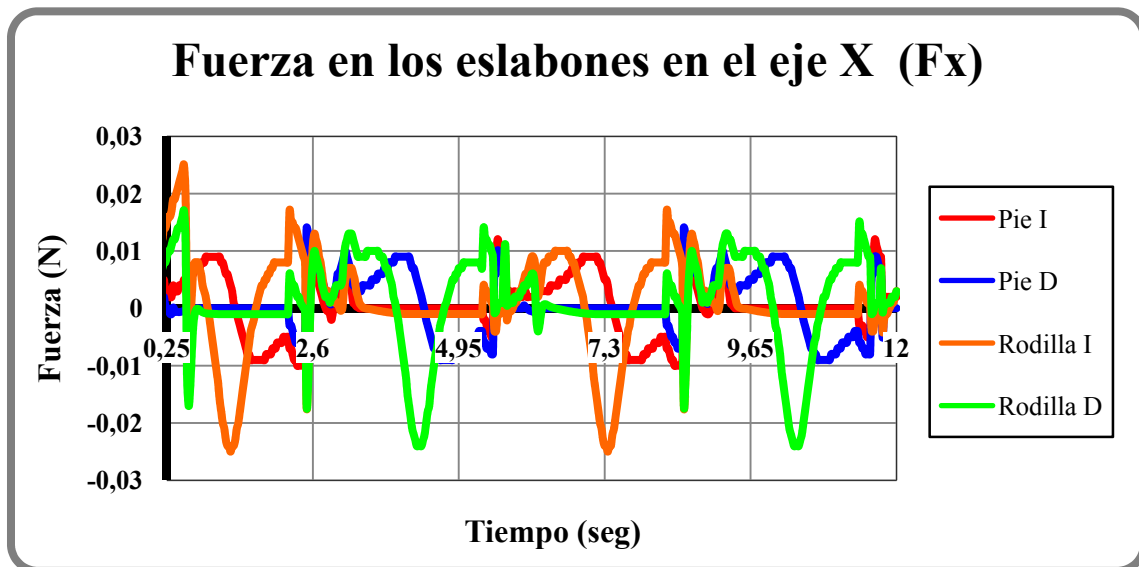


Figura 5.29: Evolución de la fuerza en el eje X en función del tiempo (Caso 4).

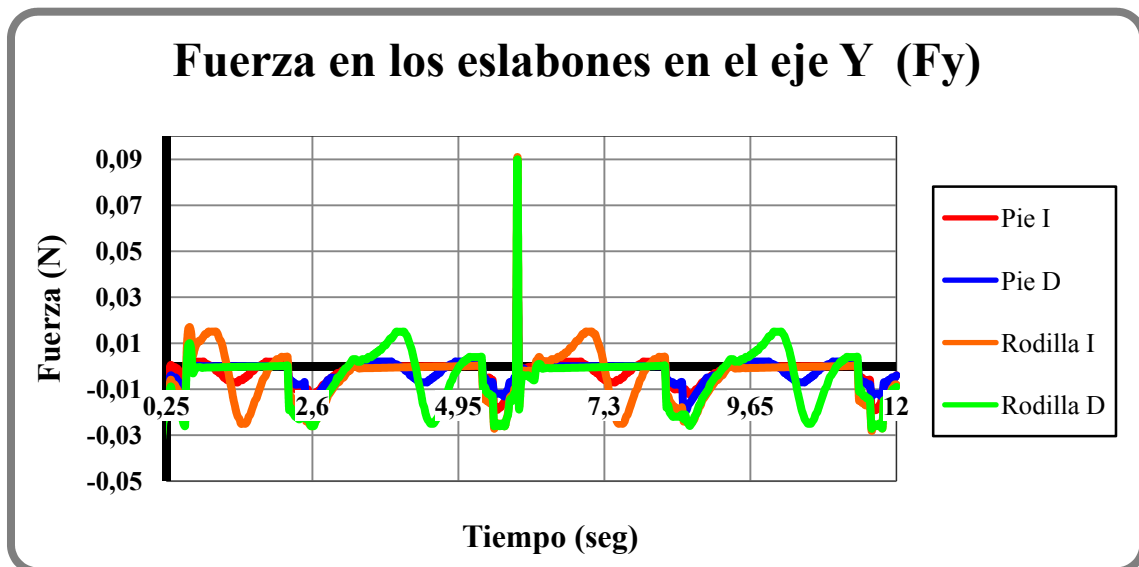


Figura 5.30: Evolución de la fuerza en el eje Y en función del tiempo (Caso 4).

Ambas figuras (5.29 y 5.30) reflejan las fuerzas que sufren los pies y las rodillas del robot Pasibot en el eje X y el eje Y respectivamente. En el tiempo de estudio se ha eliminado el instante inicial en el que el robot Pasibot cae desde la posición inicial hasta que entra en contacto con el suelo, debido a que las fuerzas en ese intervalo de tiempo es mucho mayor que las que se alcanzan en el resto del movimiento del robot Pasibot.

A la hora de comentar la figura 5.29 destacan varios detalles:

- En primer lugar destaca la evolución de la Rodilla I y la Rodilla D. Ambas sufren una evolución semejante de las fuerzas en el eje X, pero el aumento de la fuerza viene relacionado con la pierna que realice el paso. Así, cuando la pierna izquierda se levanta para completar el paso se produce un aumento de la fuerza en valores negativos, alcanzando su máximo cuando la Rodilla I está en la posición más alta. En cambio la fuerza de la Rodilla D aumenta cuando es la pierna derecha la que realiza el paso, alcanzando su máximo valor cuando la Rodilla D está en la posición más alta.
- Si se analizan las fuerzas de los pies del robot Pasibot, la evolución de ambas es semejante, aumentando el valor de la fuerza cuando aumenta la posición de la pierna correspondiente.

En cambio la evolución de la fuerza en el eje Y (figura 5.30) de los pies y las rodillas del robot Pasibot es menos clara, destacando la de la Rodilla D.

Destaca en la figura que la evolución de la Rodilla D es periódica, excepto para un valor, que alcanza un pico de un valor excesivo en comparación con el resto. Esta fuerza en el movimiento del robot Pasibot corresponde al instante en que ha apoyado el pie derecho en el suelo al completar el paso y está a punto de levantar la pierna izquierda para completar un siguiente paso, por ello la Rodilla D sufre un gran incremento de la fuerza, por la reacción que recibe.

Del resto de la figura se puede destacar que la fuerza en el eje Y de la Rodilla I sigue la misma evolución que la de la rodilla D. Sufriendo un aumento y descenso de la fuerza (una oscilación) cuando la pierna correspondiente a la rodilla es la que ejecuta el paso.

Por último la fuerza que alcanza el Pie I y el Pie D del robot Pasibot tiene menor valor que la que alcanza las rodillas del robot Pasibot, aunque ambas evoluciones son semejantes y aumentan cuando el pie correspondiente ejecuta el paso.

- Par de los eslabones.

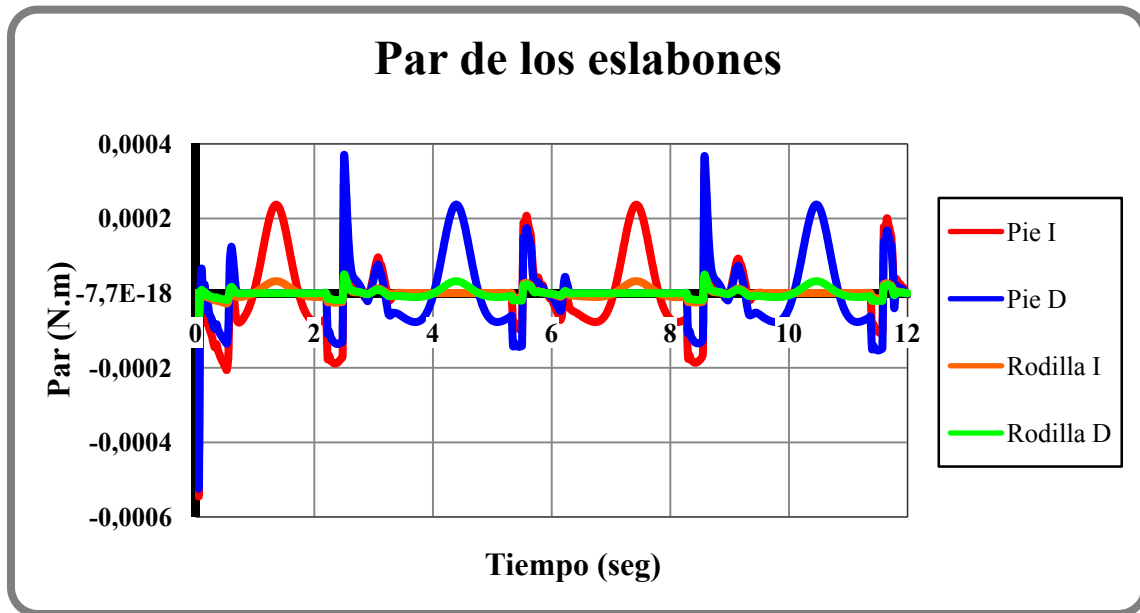


Figura 5.31: Evolución del Par en función del tiempo (Caso 4).

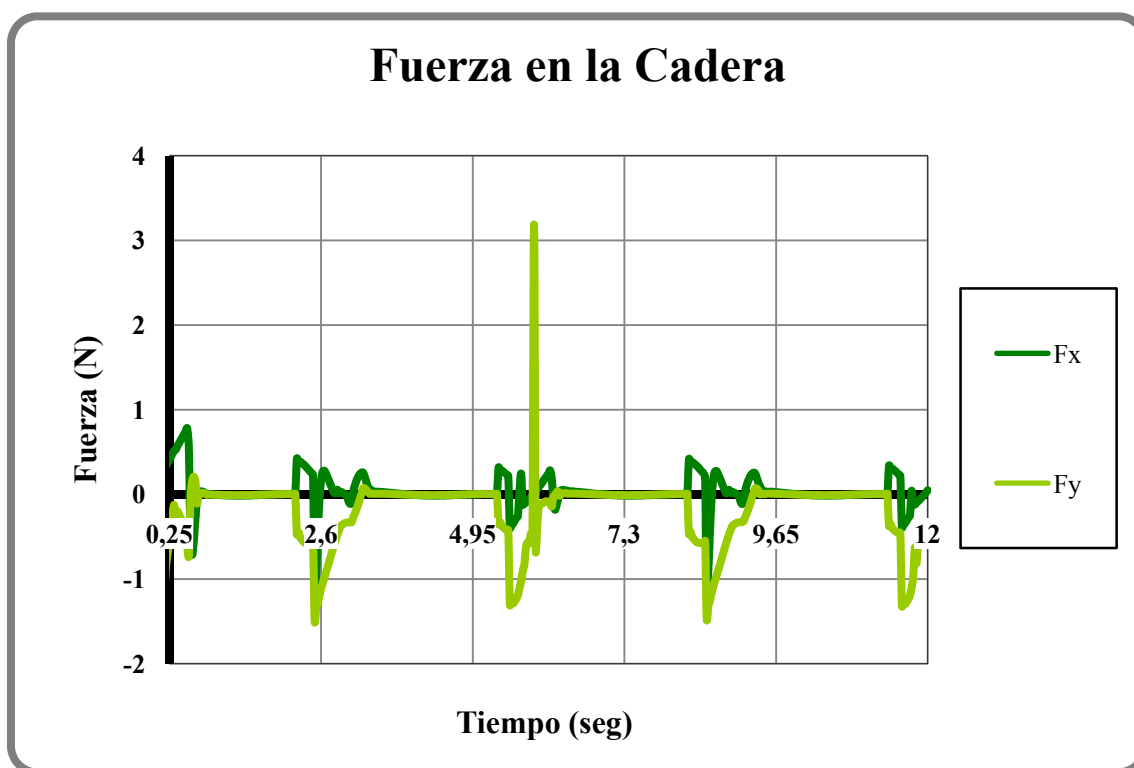
La figura 5.31 refleja la evolución del Par en función del tiempo de los pies y las rodillas del robot Pasibot.

Como se observa el tiempo de estudio no se ha modificado, aunque se puede observar que en el instante inicial, debido al momento en el que el robot Pasibot entra en contacto con el suelo, el valor del Par toma unos valores muy superiores a los que alcanza a lo largo del resto de la simulación. Pero no se ha eliminado esa parte porque, además de que así se puede ver la variación en el instante inicial, se puede ver la evolución del Par a lo largo de la simulación con claridad.

La evolución del Par en el Pie I y el Pie D es semejante, y además en algunos movimientos del robot Pasibot ese Par coincide. Estas igualdades del Par de los pies del robot Pasibot se producen cuando completa cada paso entrando la pierna en contacto con el suelo, así alcanza un máximo valor el Par.

Por lo demás, la evolución del Par de la Rodilla D y la Rodilla I es semejante. Alcanzando sus valores máximos de Par cuando se realiza el paso con la pierna correspondiente.

- Fuerza en la Cadera.



**Figura 5.32: Evolución de la fuerza de la Cadera en función del tiempo (Caso 4).**

La figura 5.32 refleja la evolución de la fuerza (tanto en el eje X como en el eje Y) en función del tiempo de la Cadera del robot Pasibot.

Los valores de la fuerza que alcanza la Cadera son mucho mayores que la del resto de piezas (figuras 5.29 y 5.30), por ello se ha decidido realizar el estudio de la fuerza por separado.

La evolución de ambas fuerzas es semejante, alcanzando sus respectivos mínimos cuando la pierna completa el paso y entra en contacto con el suelo, los mínimos que se alcanzan son mayores en el eje Y que en el eje X, y después de alcanzar ese mínimo, los valores de las fuerzas tienden a cero y no varían hasta que vuelve a entrar el pie del robot Pasibot en contacto con el suelo.

Por último destaca el pico máximo que alcanza la Cadera en el eje Y. Este máximo se produce cuando el robot Pasibot está a punto de levantar la pierna izquierda (de color rojo) para iniciar un nuevo paso.

- Par de la Cadera.

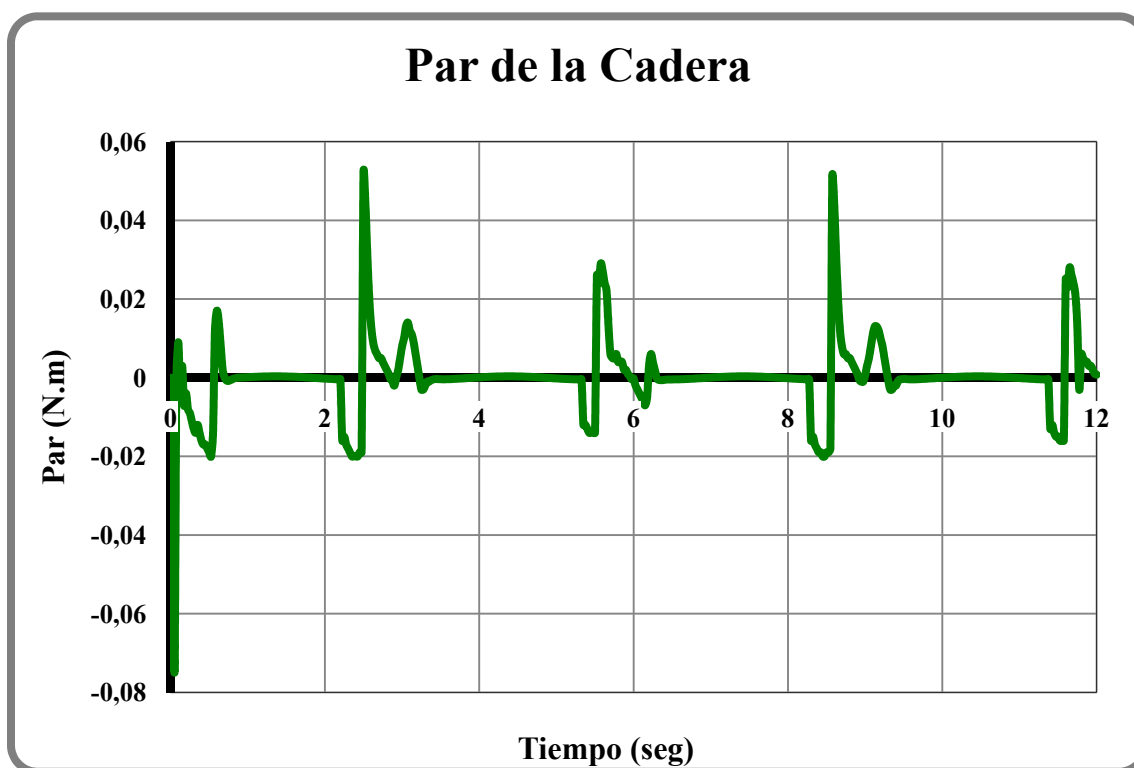


Figura 5.33: Evolución del Par de la Cadera en función del tiempo (Caso 4).

La figura 5.33 representa la evolución el Par de la Cadera en función del tiempo.

Los valores del Par que alcanza la Cadera son mucho mayores que la del resto de piezas.

El tiempo de estudio no se ha modificado porque, aunque se puede observar que en el instante inicial (robot Pasibot entra en contacto con el suelo) el Par de la Cadera alcanza el mínimo, se puede observar la evolución de Par de manera clara incluyendo ese intervalo.

Dejando de un lado el periodo inicial, el Par de la Cadera oscila alcanzando un máximo y un mínimo cuando el robot Pasibot termina de completar el paso y el pie que ha realizado el paso entra en contacto con el suelo.

- Par del Motor.

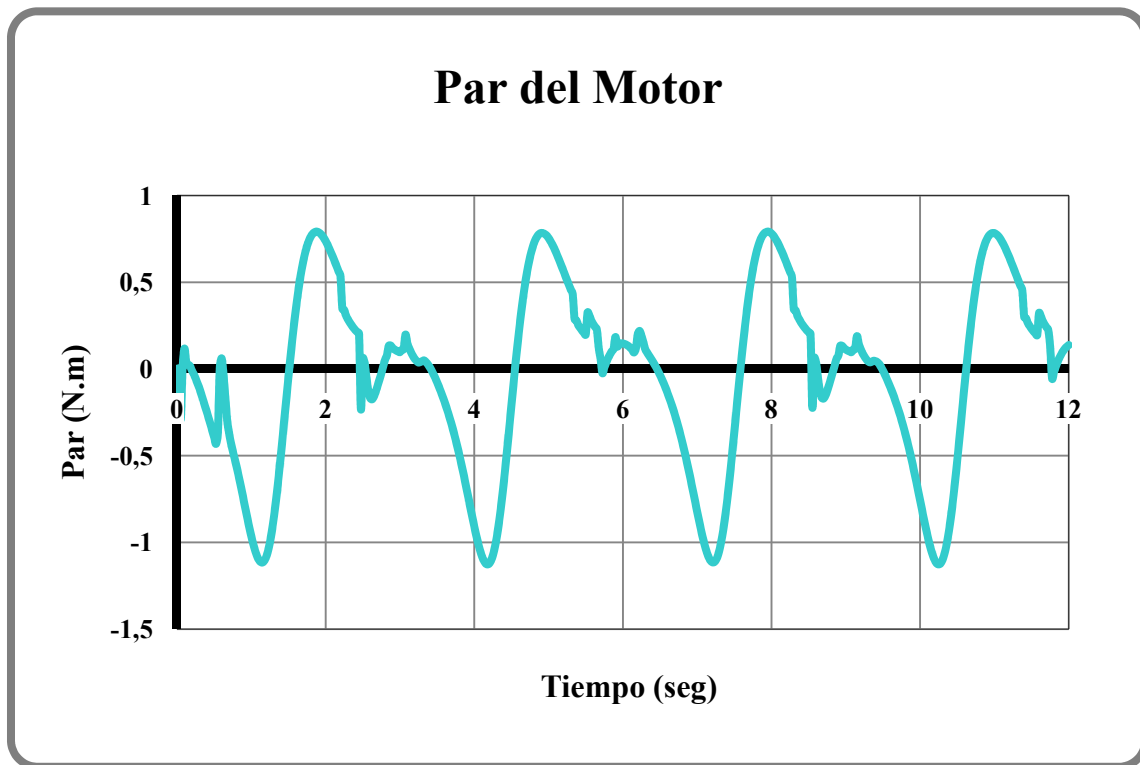


Figura 5.34: Evolución del Par del Motor en función del tiempo (Caso 4).

La figura 5.34 refleja el Par que transmite el Motor en función del tiempo. No se ha modificado el tiempo de estudio porque, en el instante inicial, la variación del Par al entrar el robot Pasibot en contacto con el suelo no es muy extremista.

La variación del Par comienza a aumentar cada vez que el robot Pasibot realiza un paso, alcanzando valores negativos a medida que comienza el paso, y cuando se aproxima a su posición más alta en el eje Y, la tendencia cambia y alcanza valores positivos.

Como en esta simulación se ha decidido que el robot Pasibot realice cuatro pasos, el Par alcanza cuatro máximos y cuatro mínimos.

- Potencia del Motor.

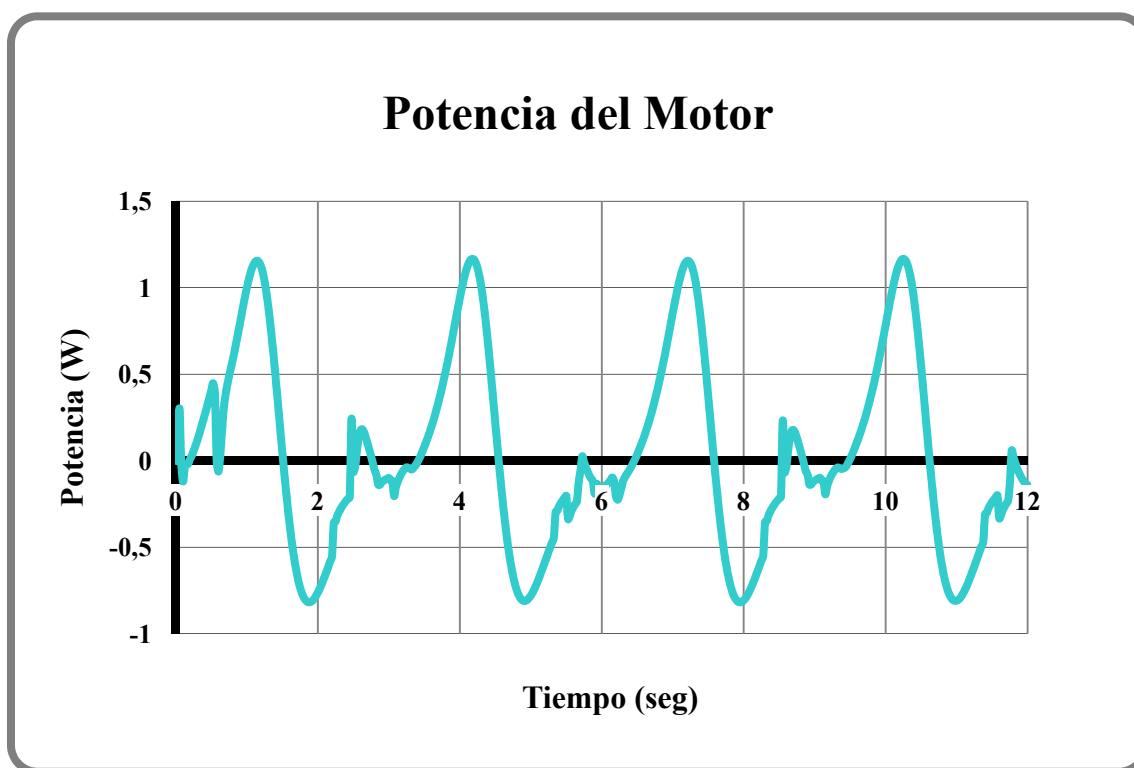


Figura 5.35: Evolución de la potencia del Motor en función del tiempo (Caso 4).

La figura 5.35 representa la potencia que proporciona el Motor para que el robot Pasibot pueda caminar a lo largo del tiempo.

Se observa que la potencia se ejecuta cuando el robot Pasibot levanta la pierna para ejecutar un paso y alcanza valores positivos. A medida que termina de completar el paso los valores que alcanza son negativos. Alcanzando cuatro máximos y mínimos porque son los pasos que ejecuta el robot Pasibot en este caso.

El Motor que trabaja para dar movimiento al robot Pasibot no es muy grande porque no alcanza más de dos Watios para producir el trabajo que requiere este caso.

### **Conclusiones del Caso 4.**

En este caso 4, si se analizan las fuerzas que sufren las diferentes piezas del robot Pasibot, se observan que son mayores en la Cadera que en los pies y las rodillas del robot Pasibot (siendo mayores las de las rodillas que las de los pies).

En las fuerzas, destaca también tanto en la Cadera como en los diferentes eslabones que se estudian en el eje Y un incremento considerable de la fuerza (del mismo valor la Rodilla D y la Rodilla I, y un valor inferior e igual del Pie D con el Pie I). Este incremento se produce cuando el robot Pasibot termina de ejecutar un paso y está a punto de levantar la pierna izquierda para ejecutar el siguiente paso. Este incremento se puede deber a la forma con la que se levanta el pie y también debido al programa WM 2D.

El Par es mayor en la Cadera que en las rodillas y pies del robot Pasibot. Pero a diferencia de las fuerzas que sufren los diferentes eslabones, el valor del Par es mayor en los pies que en las rodillas del robot.

Destacar del Motor, que fijando la velocidad del Motor como constante se obtiene una aceleración nula (WM obtiene unos valores de las aceleraciones próximas a cero, del orden de  $1^{-10}$ ). Además, fijándose en la figura de la potencia se ve que los valores que se alcanzan entre los máximos y los mínimos son diferentes dependiendo del pie que realiza el paso, esto no se tiene que tener en cuenta ya que es a causa del programa WM y es irrelevante.



---

# Capítulo 6

**Conclusiones y futuros desarrollos.**

## **6.1.- Conclusiones.**

En primer lugar se debe comentar que los objetivos marcados en el inicio de este proyecto se han cumplido. Se ha realizado un modelo preliminar de un robot bípedo que ha permitido realizar los primeros análisis cinemáticos y dinámicos previos para la construcción de un prototipo real.

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica muy detallada sobre el desarrollo de los robots bípedos y se han incluido en la memoria un estado del arte dentro del capítulo 2, para futuros desarrollos.

Se ha desarrollado en esta memoria un tutorial para la construcción de robots en Working Model (en el capítulo 3) que puede servir para futuros alumnos. Otra conclusión interesante es la utilización de Working Model 2D para experimentar con prototipos previos a la construcción de un robot.

Los resultados obtenidos tanto cinéticamente como dinámicamente se comprueba que son suficientes a la hora de disponer de datos cinéticos o de las reacciones para diseñar el robot Pasibot en el modelo real.

El modelo en Working Model 2D es válido tanto el mecanismo simplificado como los resultados obtenidos con el estudio cinemático y en el estudio dinámico, ya que al realizar el modelo analítico en Matlab, los resultados obtenidos son semejantes (pueden existir ligeras diferencia de valores, pero no en el tipo de curva, por la forma de trabajar de cada programa y el número de decimales con los que trabaja cada uno de los dos programas).

Los resultados obtenidos y presentados del modelo de simulación permiten observar el comportamiento que tendrá el futuro prototipo. Los valores obtenidos permitirán seleccionar adecuadamente el sistema de actuación (motor + reductora), así como los materiales de los eslabones. Pudiendo poner especial atención en aquellos eslabones que sufren más durante el movimiento (como la Rodilla D y la Rodilla I).

## **6.2.- Futuros desarrollos.**

A la hora de realizar posibles futuros desarrollos se tendría que utilizar en primer lugar un programa más moderno, ya que el Working Model 2D utilizado en el análisis cinemático y dinámico del robot Pasibot es una versión creada en 1996. Actualmente existen versiones mucho más modernas que corrigen fallos de versiones anteriores y que podrían solucionar los problemas de las simulaciones que se han tenido en este proyecto. Podría realizarse el diseño en WM 3D.

En el apartado 4.2. (Comprobación de los resultados con el modelo analítico) y en concreto en el estudio del segundo mecanismo, solo se ha realizado la posición y no la velocidad y la aceleración porque depende de un proyecto de otra persona que todavía no ha realizado el modelo matemático en Matlab. Por ello solo se realizó la posición ya que es suficiente para validar el modelo realizado en Working Model 2D con el modelo analítico.

Otro futuro desarrollo sería el diseño de otro mecanismo que asemeje la forma del robot Pasibot en Working Model 2D y que resulte más sencillo para realizar la simulación y así el programa no pueda crear problemas a la hora de realizar el movimiento del robot Pasibot.

---

# Capítulo 7

**Bibliografía**

- [1] [http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=robot](http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=robot)  
(Última visita: 3/03/2008)
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Cybertech>  
(Última visita: 3/03/2008)
- [3] [http://es.wikipedia.org/wiki/Tres\\_leyes\\_de\\_la\\_robotica](http://es.wikipedia.org/wiki/Tres_leyes_de_la_robotica)  
(Última visita: 3/03/2008)
- [4] <http://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap.shtml>  
(Última visita: 3/03/2008)
- [5] Barrientos, Antonio; Peñín, Luís Felipe; Balaguer, Carlos; Aracil, Rafael. *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill, 1997. 327 p. ISBN: 84-481-0815-9
- [6] [http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr\\_01/robotica/industrial.htm](http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/industrial.htm)  
(Última visita: 4/03/2008)
- [7] Apuntes de *Robótica Industrial* de la E. U. Politécnica de la Universidad de Sevilla.
- [8] Apuntes de *Robótica Industrial* de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] <http://www.geocities.com/loboduke2001/Arquitecturas.html>  
(Última visita: 4/03/2008)
- [10] <http://www.roboticspot.com/spot/artic.shtml?todo=&block=6&newspage=robots>  
(Última visita: 4/03/2008)
- [11] T. McGeer, “Passive dynamic walking”, the international journal of robotic research, vol 9, N° 2, April, 1990. pp 62-82.
- [12] T. McGeer, “Passive walking with Knees”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1640-145, 1990.
- [13] T. McGeer, Passive dynamic biped catalogue, 1991”, Proc. 2nd Int. Symp. Of Experimental Robotics, June (Chatila, R., ed.) New York: Springer-Verlag.

- [14] T. McGeer, “Passive dynamic running” Proceedings of the Royal Society of London B. 1240:107-137. 1990.
- [15] T. McGeer. “Principles of walking and running” In Advances in Comparative and Environmental Physiology, Vol. 11, Mechanics of Animal Locomotion. Berlin: Springer-Verlag. 1992.
- [16] United States Patent Office 2,140,275 “Walking Toy”. John E. Wilson, Watsontown, Pa., assignor of one-half to Nod F. Wagner, Watsontown, Pa. Application October 15, 1936, Serial No. 105,768.
- [17] [http://www.elcaribecdn.com/articulo\\_caribe.aspx?id=42285&guid=932795F48A624F5F9A11A2B56218B3C2&Seccion=13](http://www.elcaribecdn.com/articulo_caribe.aspx?id=42285&guid=932795F48A624F5F9A11A2B56218B3C2&Seccion=13)  
(Última visita: 3/03/2008)
- [18] Wisse, M.; Schwab, A. L.; Linde, R. Q. vd. “A 3D passive dynamic biped with yaw and roll compensation”. Cambridge University Press. 2001, vol 19, pp. 275–284.
- [19] [http://www.elpais.com/articulo/sociedad/nuevos/robots/andan/igual/eficiencia/humanos/elpepisoc/20050218elpepisoc\\_5/Tes/](http://www.elpais.com/articulo/sociedad/nuevos/robots/andan/igual/eficiencia/humanos/elpepisoc/20050218elpepisoc_5/Tes/)  
(Última visita: 3/03/2008)
- [20] [http://www.euroresidentes.com/Blogs/avances\\_tecnologicos/2005/02/avances-en-la-robotica-robots-que.htm](http://www.euroresidentes.com/Blogs/avances_tecnologicos/2005/02/avances-en-la-robotica-robots-que.htm)  
(Última visita: 3/03/2008)
- [21] <http://www.youtube.com/watch?v=CK8IFEGmiKY>  
(Última visita: 4/03/2008)
- [22] <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/CBalaguer-CEDI2007.pdf>  
(Última visita: 3/03/2008)
- [23] <http://www.idemployee.id.tue.nl/g.w.m.rauterberg/presentations/HCI-history/sld091.htm>  
(Última visita: 3/03/2008)
- [24] [http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato\\_2.html](http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html)  
(Última visita: 3/03/2008)
- [25] <http://www.springerlink.com/content/wu172j447416w185/>  
(Última visita: 3/03/2008)
- [26] <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/research/wabian/index.htm>

(Última visita: 3/03/2008)

- [27] <http://world.honda.com/ASIMO/history/history.html>

(Última visita: 3/03/2008)

- [28] <http://www.backendblog.com/2007/05/16/la-evolucion-de-asimo-del-e0-al-asimo/>

(Última visita: 3/03/2008)

- [29] <http://comunidad.terra.es/blogs/nationalgeographic/archive/2007/12/14/asimoelmticorobotdehondaenversinmejorada.aspx>

(Última visita: 3/03/2008)

- [30] [http://www.honda.es/car/content/company/our\\_values/advanced\\_technology/asimo.fsp](http://www.honda.es/car/content/company/our_values/advanced_technology/asimo.fsp)

(Última visita: 3/03/2008)

- [31] <http://www.roboticspot.com/spot/vernot.shtml?noticia=Tue-Sep-28-09:43:27-2004>

(Última visita: 3/03/2008)

- [32] [http://www.seguritron.com/los\\_20\\_mas.htm](http://www.seguritron.com/los_20_mas.htm)

(Última visita: 3/03/2008)

- [33] [http://maqlab.uc3m.es/PFC/HD/PFC\\_JMMoreno.pdf](http://maqlab.uc3m.es/PFC/HD/PFC_JMMoreno.pdf)

(Última visita: 3/03/2008)

- [34] <http://archivo.elnuevodiario.com.ni/2004/marzo/12-marzo-2004/variedades/variedades5.html>

(Última visita: 3/03/2008)

- [35] <http://www.pixelydixel.com/2003/12/qrio-el-robot-que-anda-salta-corre.html>

(Última visita: 3/03/2008)

- [36] [http://www.design-simulation.com/WM2D/success/ss\\_nasajpl.php](http://www.design-simulation.com/WM2D/success/ss_nasajpl.php)

(Última visita: 8/04/2008)

- [37] Software Review; Motion Simulation with Working Model 2D and MSC. visualNastran 4D; Shih-Liang (Sid) Wang; Department of Mechanical Engineering (North Carolina A&T State University).

- [38] <http://www.addlink.es/productos.asp?pid=94>  
(Última visita: 9/04/2008)
- [39] <http://www.calculationmanagement.com/productos.asp?pid=95>  
(Última visita: 9/04/2008)
- [40] [http://www.software-shop.com/in.php?mod=ver\\_producto&prdID=202&PHPSESSID=873f07f0664c4f1de9815d8b26a6b16f](http://www.software-shop.com/in.php?mod=ver_producto&prdID=202&PHPSESSID=873f07f0664c4f1de9815d8b26a6b16f)  
(Última visita: 9/04/2008)
- [41] [http://www.taringa.net/posts/downloads/902970/Working-Model-2D-\(simulador-de-movimientos\).html](http://www.taringa.net/posts/downloads/902970/Working-Model-2D-(simulador-de-movimientos).html)  
(Última visita: 9/04/2008)